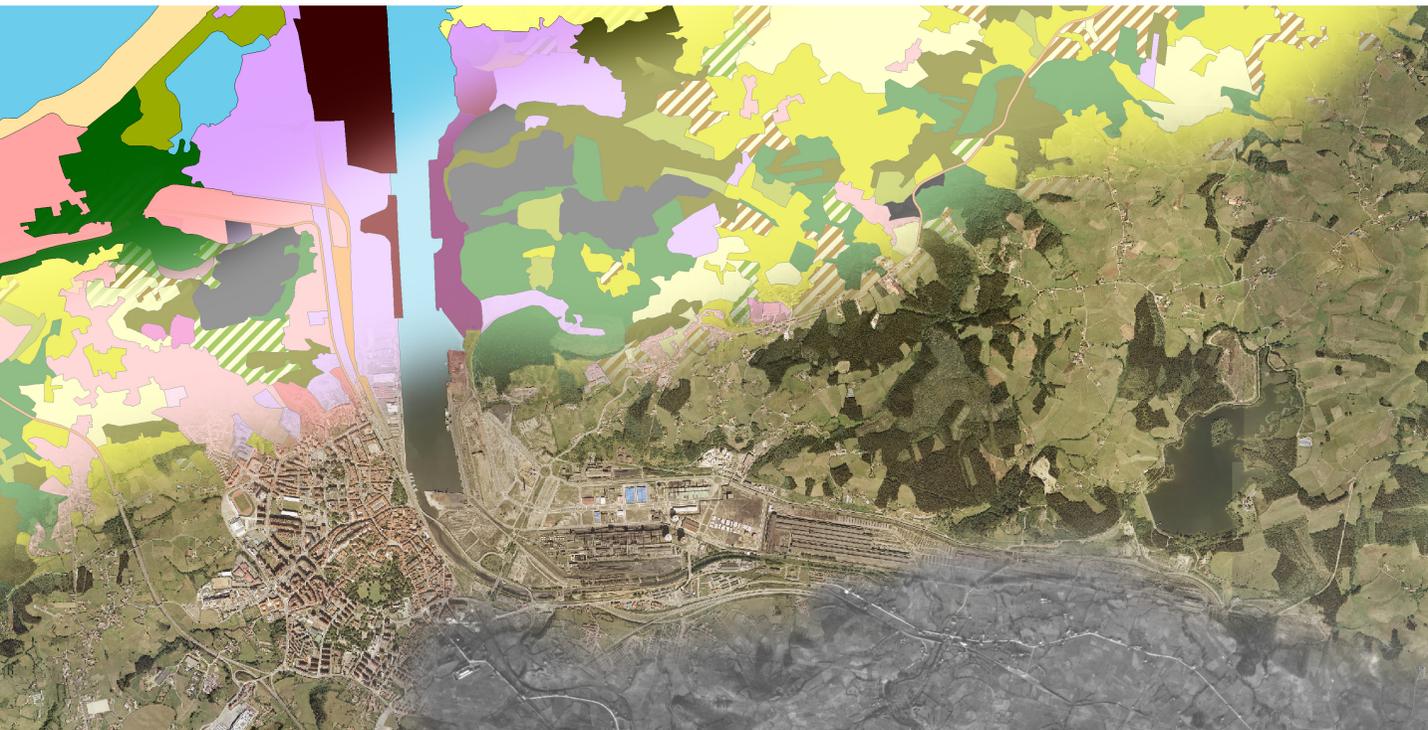


Tesis doctoral
**APROXIMACIÓN AL ESTUDIO
DE LA INCERTIDUMBRE EN LA MODELIZACIÓN
DEL CAMBIO DE USOS Y COBERTURAS DEL SUELO (LUCC)**



David García Álvarez

Directores

María Teresa Camacho Olmedo

Martin Paegelow

Granada, 2018

Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física
Programa de Doctorado en Ciudad, Territorio y Planificación Sostenible



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**

**Aproximación al estudio de la incertidumbre
en la modelización del Cambio de Usos y
Coberturas del Suelo (LUCC)**



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**

David García Álvarez

Universidad de Granada

Programa de Doctorado en Ciudad,
Territorio y Planificación Sostenible

Directores:

María Teresa Camacho Olmedo

Martin Paegelow

Editor: Universidad de Granada. Tesis Doctorales
Autor: David García Álvarez
ISBN: 978-84-9163-971-8
URI: <http://hdl.handle.net/10481/52908>

Agradecimientos

La culminación de esta tesis supone el fin de una etapa académica, pero también personal, que no sería justo concluir sin agradecer a aquellos que han formado parte de la misma y a los que la han hecho posible.

En primer lugar, quiero mostrar mi más sincero y profundo agradecimiento a mi directora de tesis, Mayte Camacho, por haber depositado su confianza en mí y, especialmente, por haberme dado la libertad necesaria como para convertir la realización de esta tesis en una experiencia vital que jamás olvidaré, la cual define una intensa y bonita etapa de mi vida. Una etapa de indudable crecimiento académico, pero de especial desarrollo personal, que me ha permitido cumplir muchos de mis sueños. Gracias, Mayte, por haberme apoyado y animado a descubrir todos los maravillosos lugares y personas que la realización de esta tesis me ha permitido conocer. Gracias también por tu cariño y afecto. Gracias, en definitiva, por haber convertido este contrato predoctoral en un regalo que no imagino haber podido disfrutar más.

Gracias también a Martin Paegelow, mi codirector de tesis, por sus pertinentes comentarios y apoyo en la realización de esta investigación. También a Jean François Mas, por aceptar mi invitación a colaborar en la realización de uno de los capítulos que conforman parte de esta tesis.

Gracias a Hedwig Van Delden. Por haberse convertido, a la larga, en algo así como mi tercera directora de tesis. Por sus valiosos consejos, su cariño y sus constantes ideas de mejora y nuevas líneas de trabajo, que sin duda definen gran parte de los contenidos de esta investigación. Gracias también por haberme dado la llave a conocer nuevos lugares y vivir nuevas experiencias.

Gracias a Chris Lloyd, por haberme recibido en la Universidad de Liverpool y haberme facilitado todo cuanto fue necesario para hacer mi estancia en esta universidad lo más cómoda posible. Gracias también a Chris Pettit y Simone Zarpelon Leão, por esos tres meses de trabajo en Sydney, en los que siempre estuvieron disponibles para solucionar cualquiera de los innumerables problemas a los que me enfrenté para poner en marcha un modelo para esta ciudad.

Gracias también a todos mis compañeros de departamento, que han contribuido a hacer de mi trabajo una agradable tarea, a menudo acompañada de innumerables sonrisas. Gracias, especialmente, a Jonatan, a María José, a José Luis y a Emilio. Porque su compañía es fundamental para explicar el grato recuerdo que guardo de mi labor diaria en la

facultad. Gracias también a Enrique, por todos los trámites que ha tenido que hacer durante esta tesis y por su disposición a solucionar cualquiera de las dudas que el formateo y la burocracia me han originado.

Gracias a todos aquellos que en Asturias aceptaron mi llamada y me dedicaron parte de su tiempo en los pasos iniciales de esta tesis. A mis compañeros de la Universidad de Oviedo: Gaspar Fernández Cuesta, Felipe Fernández García, Fernando Rubiera Morollón y Fermín Rodríguez Gutiérrez. A Marcos Ortega, Marta Herrán, Manuel Carrero de Roa y Víctor González Marroquín.

Gracias a aquellas entidades que me han dado la financiación para realizar esta tesis o alguna de las muchas actividades que sobre ella he realizado. Al Ministerio de Economía y Competitividad, por haber financiado el contrato que ha hecho posible esta tesis y mi estancia en la UNSW. Gracias también a la Universidad de Granada, por financiar parte de mi primera estancia en la Universidad de Liverpool.

Gracias a Ana, mi compañera de piso, por haberme dado unos pocos consejos que, sin embargo, estoy seguro me han ahorrado mucho tiempo en el formateo de esta tesis. Gracias también a todos aquellos con los que he convivido en Granada durante estos tres años y que han contribuido a esta feliz etapa de mi vida. Gracias, en definitiva, a todos los que durante estos tres años han formado parte de mi vida y, en algún momento, han compartido mis inquietudes y problemas. A aquellos que he conocido en Granada. A todos mis amigos en Asturias, por actuar de fundamental punto de desconexión. A toda aquella buena gente que he conocido en Liverpool, Maastricht y Sydney y que, sin dudas, están vinculadas también a esta tesis y la etapa de mi vida que representa.

Por último, no quisiera concluir estos agradecimientos sin mostrar mi mayor agradecimiento a mi familia. Por haberme apoyado constantemente en todas las decisiones que he tomado hasta el momento. Por creer en mí y por haberme dado una educación y valores sin los que nada de lo que he hecho en mi vida hubiera sido posible.

Financiación

Esta tesis es uno de los resultados del proyecto MINECO I+D BIA2013-43462-P, titulado “SIMULACIONES GEOMÁTICAS PARA MODELIZAR DINÁMICAS AMBIENTALES II. Horizonte 2020” (SIGEOMOD_2020) financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad y por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional FEDER.

El autor agradece también al Ministerio de Economía y Competitividad y al Fondo Social Europeo por la financiación de su actividad investigadora (Ayudas para contratos predoctorales para la formación de doctores 2014).

Resumen

Todo dato o análisis espacial cuenta con una cierta incertidumbre asociada, debido a la imposibilidad de representar de esta forma toda la complejidad de la superficie terrestre o de los procesos que sobre ella operan. Cabe así admitir la inevitabilidad de esta incertidumbre, la cual es consustancial a cualquier representación o estudio geoespacial.

Si bien eliminar esta incertidumbre no es posible, sí podemos llevar a cabo una adecuada caracterización de la misma, de tal manera que tanto el usuario como la audiencia sean conscientes de las limitaciones de nuestros datos o análisis. Esta tesis pretende dar respuesta a tal necesidad, a partir de la caracterización de la incertidumbre de un análisis geoespacial concreto: la Modelización del Cambio de Usos y Coberturas del Suelo (Land Use Cover Change Modelling, LUCCM). Si bien la investigación realizada se centra en este tipo de análisis, sus planteamientos y las conclusiones alcanzadas pueden ser de interés para cualquier usuario que trabaje en el campo del análisis geoespacial.

En esta investigación se entiende la incertidumbre como la falta de confianza o certidumbre sobre cualquier dato o análisis geoespacial, consecuencia de la diferencia entre la forma en la que estos representan o interpretan un determinado objeto, superficie o sistema y cómo este es en realidad. Se considera la escala como un componente esencial de tal incertidumbre. La escala determina el grado de simplificación del objeto, superficie o sistema analizado y, por tanto, la incertidumbre que este puede contener. Es así el componente esencial que subyace al modelo conceptual utilizado en la representación de un determinado espacio o característica terrestre, o bien en el análisis o reproducción de cualquier proceso espacial.

Los resultados de la tesis se dividen en tres bloques. El primero, de carácter teórico, asienta el marco conceptual de trabajo. Los dos bloques siguientes analizan en profundidad, para un ámbito de estudio concreto, las incertidumbres asociadas a las fuentes cartográficas de Usos y Coberturas del Suelo (Land Use Land Cover, LULC) y al propio ejercicio de modelización del Cambio de Usos y Coberturas del Suelo (Land Use Cover Change, LUCC). El peso especial otorgado a la incertidumbre de las fuentes cartográficas LULC se debe a que estas constituyen la base de funcionamiento de la modelización LUCC y, por tanto, sus incertidumbres resultan determinantes en los resultados alcanzados mediante este tipo de análisis.

El área de estudio elegida para la realización de los análisis empíricos de esta investigación es el Área Central de Asturias (ACA). Su selección obedece al acusado dinamismo territorial que presenta en el conjunto del Principado de Asturias, así como por el interés que la evolución de este espacio tiene para agentes y actores territoriales. La investigación incluye información sobre la delimitación adoptada del área de estudio, así como sobre el sistema territorial del ACA y sus cambios LULC recientes.

Entre los capítulos teóricos, la tesis presenta una introducción conceptual al campo de la LUCCM. Define este tipo de análisis, indicando su utilidad y el flujo habitual de trabajo. Además, caracteriza algunos de los principales métodos y técnicas habitualmente empleados en este tipo de análisis. A continuación, se define la incertidumbre y los conceptos asociados a la misma. También se realiza una caracterización de tal término, abordando en profundidad las fuentes de incertidumbre posibles en cualquier análisis espacial y, en detalle, en la LUCCM. Se incluye también información sobre actitudes, métodos y estrategias a seguir para llevar a cabo el manejo de esta incertidumbre. Finalmente, la tesis propone un marco teórico para llevar a cabo el estudio de la escala en los análisis geoespaciales. Además, realiza una detallada caracterización del papel que la escala ejerce en cada uno de los pasos de un ejercicio de modelización LUCC e intenta proponer una serie de pautas o consejos a seguir en la selección de la escala de análisis más apropiada.

El estudio de la incertidumbre de la cartografía LULC se ha dividido en dos capítulos, de distinto alcance y temática. En el primero, se ha llevado a cabo una revisión de las principales fuentes cartográficas LULC existentes a cuatro escalas: global, continental (Europa), nacional (España) y regional (Asturias). Se han valorado las características y limitaciones de cada fuente, lo que ha permitido una adecuada selección de los datos a emplear en los análisis prácticos subsiguientes. En el segundo capítulo, se ha realizado un análisis de detalle de la incertidumbre de una de las bases de datos LULC empleadas en la tesis y que, además, constituye una de las fuentes cartográficas LULC más utilizadas internacionalmente (CORINE Land Cover).

El estudio de la incertidumbre asociada a un ejercicio de modelización LUCC se ha dividido en tres capítulos. Los dos primeros analizan la influencia que tres componentes de la escala (escala cartográfica, unidad mínima cartografiable y resolución temática) tienen en el funcionamiento de un modelo LUCC. El tercero realiza una caracterización general de las fuentes de incertidumbre asociadas a un ejercicio de modelización LUCC a partir de la comparación de una aplicación implementada en cuatro software de modelización LUCC de difundido uso (CA_Markov, Dinamica EGO, Land Change Modeler y Metronamica).

Los resultados de esta investigación evidencian la considerable cantidad de incertidumbres asociadas a cualquier análisis geoespacial, y en concreto, a la Modelización del Cambio de los Usos y Coberturas del Suelo. Gran parte de esta incertidumbre deviene de los datos LULC empleados. En este sentido, las capas CORINE Land Cover realizadas desde 2006 incluyen importantes problemas metodológicos, que deben ser tenidos en cuenta en futuras actualizaciones de este producto. En función de la escala de análisis empleada, los resultados de un ejercicio de modelización LUCC pueden ser muy distintos. El usuario debe de realizar así una adecuada caracterización del objeto de estudio y, en consecuencia, seleccionar la escala más apropiada para su análisis. Solo así se puede llevar a cabo un adecuado manejo de la incertidumbre del estudio realizado, en función de la escala seleccionada.

Finalmente, según el software de modelización empleado, los resultados de nuestros estudios pueden mostrar importantes diferencias. Esta investigación plantea las ventajas y desventajas de cada enfoque, así como la necesidad de considerar detalladamente las características de cada modelo y la forma en la que estos llevan a cabo la conceptualización de la realidad modelada. Sólo de esta forma se puede seleccionar la herramienta más

adecuada para el mejor manejo de la incertidumbre asociada al objeto de estudio seleccionado y su conceptualización.

En conjunto, esta investigación supone una aproximación general al estudio de la incertidumbre en la Modelización del Cambio de los Usos y Coberturas del Suelo, que asienta el marco teórico fundamental para llevar a cabo este análisis y que, sobre todo, proporciona realismo y transparencia en el estudio de la incertidumbre asociada a los análisis geoespaciales. En este sentido, más que constituir una investigación cerrada y que pone claros límites al problema de la incertidumbre, esta tesis puede utilizarse como referencia para el reconocimiento de las limitaciones asociadas al estudio de la misma y, sobre todo, de cara a entender la complejidad de su estudio y la necesidad de adoptar perspectivas holísticas en la realización de tal tarea.

En consecuencia, las conclusiones de esta investigación pasan por el reconocimiento de esas limitaciones y la necesidad de contar con mejor y más información sobre la incertidumbre, que reconozca su inevitabilidad y la dificultad de su estudio.

“As far as the laws of mathematics refer to reality,
they are not certain;
and as far as they are certain,
they do not refer to reality”

Albert Einstein

“I admit that mathematical science is a good thing.
But excessive devotion to it is a bad thing”

Aldous Huxley

I. INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	1
1. INTRODUCCIÓN, CONTEXTO Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.1 Introducción	3
1.2 Contexto de la investigación.....	8
1.3 Hipótesis de la investigación.....	10
1.4 Objetivos de la investigación.....	11
1.4 Estructura de la investigación	12
2. ÁREA DE ESTUDIO	17
2.1 Introducción	17
2.2 El Área Central de Asturias (ACA) como realidad geográfica y administrativa. El problema de su delimitación	18
2.2.1 El reconocimiento académico.....	19
2.2.2 El reconocimiento institucional.....	23
2.2.2.1 <i>El ACA en los primeros documentos de ordenación y planificación económica</i>	23
2.2.2.2 <i>El ACA en las Directrices Regionales de Ordenación del Territorio</i>	24
2.2.2.3 <i>El reconocimiento del ACA en la planificación sectorial</i>	25
2.2.2.4 <i>La fallida actualización/ revisión de las directrices regionales y la redefinición del Área Central</i>	27
2.2.3 La delimitación adoptada en esta investigación	28
2.1 El sistema territorial del ACA	30
2.3.1 El Área Central como parte integrante y definidora del conjunto regional.....	30
2.3.2 Las características definidoras de su sistema territorial.....	31
2.3.3 La evolución histórica del sistema territorial	34
2.3.3.1 <i>Los antecedentes</i>	34
2.3.3.2 <i>La polarización territorial con la primera industrialización: la aparición del “ocho asturiano”</i>	35
2.3.3.3 <i>Del ocho al triángulo asturiano</i>	36
2.3.3.4 <i>La reconversión industrial. Del triángulo al trapecio y la dualidad Oviedo-Gijón</i>	38
2.3.4 Caracterización de los grandes centros urbanos y funcionales.....	40
2.3.4.1 <i>La Comarca de Avilés</i>	40
2.3.4.2 <i>Gijón y su franja periurbana</i>	43
2.3.4.3 <i>Oviedo y el centro metropolitano</i>	47
2.3.4.4 <i>Las Cuencas Mineras</i>	50
2.3.5 Las villas y el espacio rural del ACA	56
2.3.5.1 <i>La ruralidad residual</i>	57
2.3.5.2 <i>La ruralidad patente</i>	59
2.3.5.3 <i>Los usos de rechazo</i>	60
2.3.5.4 <i>Las villas de carácter intermedio</i>	61
2.3.6 Una caracterización temática del Área Central.....	63
2.3.6.1 <i>Tipos y dinámicas de los usos residenciales</i>	63
2.3.6.2 <i>Tipos y dinámicas de los usos industriales</i>	67
2.3.7 La evolución reciente de los usos y coberturas del suelo	70
2.3.7.1 <i>Los usos residenciales</i>	71

2.3.7.2 <i>Los usos industriales y comerciales</i>	79
2.4 Conclusiones	85
3. FUENTES Y MÉTODOS	89
3.1 Introducción	89
3.2 Fuentes	90
3.2.1 Bases de datos de usos y coberturas del suelo.....	90
3.2.2 Otras fuentes empleadas.....	91
3.3 Modelos	92
3.4 Métodos y técnicas	93
3.4.1 Análisis visual	94
3.4.2 Índices del desacuerdo en las cantidades y la localización.....	95
3.4.3 Índices sobre la configuración de los mapas	96
3.4.4 Índices de correlación entre mapas	97
II. MARCO CONCEPTUAL Y METODOLÓGICO	99
4. LA MODELIZACIÓN DEL CAMBIO DE USOS Y COBERTURAS DEL SUELO.	
UNA INTRODUCCIÓN CONCEPTUAL Y METODOLÓGICA	101
4.1 Introducción	101
4.2 ¿Qué es?	101
4.3 ¿Para qué se utiliza?	103
4.4 ¿Qué datos se necesitan?	104
4.5 ¿En qué consiste?	106
4.5.1 La calibración	108
4.5.2 La simulación.....	109
4.5.3 La validación.....	110
4.6 Tipos de modelos	111
4.6.1 Según la escala de análisis.....	111
4.6.2 Modelos estocásticos vs modelos deterministas	112
4.6.3 De acuerdo con el tipo de escenarios generados	112
4.6.4 Según la conceptualización del proceso de simulación.....	113
4.6.5 De acuerdo con la metodología o técnicas empleadas.....	113
4.6.5.1 <i>De acuerdo con el método empleado para relacionar la variable dependiente</i> <i>y las variables independientes</i>	114
4.6.5.2 <i>Según el uso o no de autómatas celulares (CA)</i>	114
4.6.5.3 <i>Según el empleo de otras técnicas</i>	116
4.7 Conclusiones	117
5. UNCERTAINTY CHALLENGE IN GEOSPATIAL ANALYSIS.	
AN APPROXIMATION FROM THE LAND USE COVER CHANGE	
MODELLING PERSPECTIVE	119
5.1 Introduction	119

5.2 What means uncertainty?	120
5.3 The three dimensions of uncertainty	121
5.4 Sources of Uncertainty in Geospatial Analysis.	
An approximation from the LUCCM perspective	122
5.4.1 Problem conceptualization	124
5.4.2 Data sources and processing	126
5.4.3 Technical uncertainty	129
5.4.4 Parametrization	130
5.4.5 Validation and propagation of uncertainty	131
5.4.6 Process variability and communication of results.....	133
5.5 How dealing with uncertainty?	134
5.5.1 Transparency and communication	134
5.5.2 Methods and strategies	135
5.6 Concluding remarks	138
6. LA ESCALA COMO FUENTE Y HERRAMIENTA PARA EL MANEJO DE LA	
INCERTIDUMBRE. UN ENFOQUE DESDE LA PERSPECTIVA DE LA	
MODELIZACIÓN DEL CAMBIO DE USOS Y COBERTURAS DEL SUELO	141
6.1 Introducción	141
6.2 ¿Qué es la escala? El problema de su definición	141
6.2.1 Espacio y escala. El debate epistemológico	142
6.2.2 Las distintas acepciones del término “escala”	143
6.2.3 Los tres niveles de la escala: dimensiones, tipos y componentes.....	146
6.2.1.1 <i>Las dimensiones de la escala</i>	146
6.2.1.2 <i>Los tipos de escala</i>	146
6.2.1.3 <i>Los componentes de la escala</i>	147
6.3 Escala y relaciones escalares en la Ciencia de la Información Geográfica.	
Un enfoque cuantitativo	152
6.3.1 La concepción escalar de la realidad	152
6.3.2 Las relaciones escalares y su conceptualización geoespacial.....	154
6.3.3 El escalado y sus consecuencias.....	155
6.3.3.1 <i>El Modifiable Areal Unit Problem (MAUP)</i>	155
6.3.3.2 <i>El Category Aggregation Problem (CAP)</i>	157
6.3.3.3 <i>Las falacias de inferencia espacial (inference fallacies)</i>	157
6.4 La escala en la Modelización del Cambio de Usos y Coberturas del Suelo	159
6.4.1 La conceptualización del objeto de estudio	159
6.4.1.1 <i>La delimitación del objeto de estudio</i>	159
6.4.1.2 <i>Las unidades de análisis</i>	161
6.4.2 Los datos empleados.....	170
6.4.3 La validación del modelo	171
6.4.4 Visualización y comunicación de los resultados.....	172
6.5 ¿Qué escala seleccionar? Una pregunta sin respuesta	173

6.5.1 La caracterización escalar del objeto de estudio. Un requisito previo.....	174
6.5.2 Pasos a seguir en la selección de la escala o escalas de análisis.....	174
6.5.3 Propuestas concretas de escalas a utilizar.....	176
6.6 Conclusiones	177
III. ANÁLISIS DE LA INCERTIDUMBRE EN LA CARTOGRAFÍA DE USOS Y COBERTURAS DEL SUELO	181
7. FUENTES CARTOGRÁFICAS PARA EL ESTUDIO DEL CAMBIO DE USOS Y COBERTURAS DEL SUELO. ESTADO DE LA CUESTIÓN	183
7.1 Introducción	183
7.2 Fuentes cartográficas para el estudio del <i>Land Use Cover Change</i> (LUCC)	184
7.2.1 Identificación y recopilación de fuentes	184
7.2.2 Fuentes cartográficas a escala global	186
7.2.2.1 <i>Fuentes generales LULC</i>	186
7.2.2.2 <i>Fuentes temáticas LULC</i>	190
7.2.3 Fuentes cartográficas a escala continental (Europa)	191
7.2.3.1 <i>Fuentes generales LULC</i>	191
7.2.3.2 <i>Fuentes temáticas LULC</i>	195
7.2.4 Fuentes cartográficas a escala nacional (España)	197
7.2.4.1 <i>Fuentes generales LULC</i>	197
7.2.4.2 <i>Fuentes temáticas LULC</i>	199
7.2.5 Fuentes cartográficas a escala regional (Asturias)	200
7.3 Limitaciones, potencialidades y líneas de trabajo.....	201
7.4 ¿Qué fuente seleccionar?	203
7.5 Conclusiones	204
8. CHANGES IN THE METHODOLOGY USED IN THE PRODUCTION OF THE SPANISH CLC: UNCERTAINTY ANALYSIS OF THE NEW MAPS	207
8.1 Introduction.....	207
8.2 Sources	209
8.2.1 CORINE Land Cover (CLC).....	209
8.2.1.1 <i>Change of CLC production methodology in Spain: SIOSE generalization</i>	210
8.2.2 SIOSE.....	211
8.3 Study area	212
8.4 Method	213
8.5 Results.....	216
8.5.1 Differences in the quantity and allocation of CLC classes.....	216
8.5.2 Differences in the distribution pattern and shape of CLC patches	219
8.5.3 Comparison of CLC with SIOSE.....	221
8.6 Discussion.....	224
8.6.1 Uncertainties linked to generalization methodologies	224
8.6.2 CLC limitations	226

8.7 Conclusions	227
IV. ANÁLISIS DE LA INCERTIDUMBRE EN LA MODELIZACIÓN DEL CAMBIO DE USOS Y COBERTURAS DEL SUELO	229
9. THE INFLUENCE OF THE SPATIAL SCALE IN LUCC MODELLING. A COMPARISON BETWEEN TWO DIFFERENT LULC MAPS (SIOSE AND CLC)	231
9.1 Introduction.....	231
9.2 Test area and data sets	232
9.2.1 Test area	232
9.2.2 Data Sets	232
9.3 Methodology	235
9.3.1 Data set processing	235
9.3.2 Modelling	237
9.3.2.1 <i>Modeling framework</i>	237
9.3.2.2 <i>Model calibration and simulation</i>	237
9.3.3 Data analysis and assessment	240
9.4 Results	241
9.4.1 Quantity disagreement	241
9.4.1.1 <i>Input maps</i>	241
9.4.1.2 <i>Simulated changes</i>	243
9.4.2 Allocation disagreement	243
9.4.2.1 <i>Input maps</i>	243
9.4.2.2 <i>Simulated changes</i>	244
9.4.3 Pattern disagreement.....	245
9.4.3.1 <i>Input maps</i>	245
9.4.3.2 <i>Simulated and real changes</i>	245
9.5 Discussion	248
9.5.1 Data sets uncertainty	248
9.5.2 Model parameters	249
9.5.3 Modelled pattern.....	250
9.5.4 Allocation differences	250
9.6 Conclusion and outlook.....	251
10. CONSECUENCIAS DE LA ELECCIÓN DE LA RESOLUCIÓN TEMÁTICA EN LA CALIBRACIÓN DE UN MODELO DEL CAMBIO DE USOS Y COBERTURAS DEL SUELO.....	255
10.1 Introducción.....	255
10.2 Área de estudio y materiales	256
10.3 Metodología	258
10.3.1 <i>Metronamica</i>	258
10.3.2 <i>Calibración y validación</i>	259

10.4 Resultados y discusión	261
10.4.1 Variación de las demandas	261
10.4.2 Cantidad y tipología de los cambios que tienen lugar	263
10.4.3 Complejidad del patrón simulado.....	264
10.5 Conclusiones.....	265
11. GLOBAL UNCERTAINTY ANALYSIS IN LUCC MODELLING THROUGH THE COMPARISON OF FOUR MODEL SOFTWARE PACKAGES	269
11.1 Introduction	269
11.1.1 Main sources of uncertainty in LUCCM	270
11.1.2 Model comparison as a useful approach for global uncertainty assessment in LUCCM.....	272
11.1.3 Objectives and research questions.....	272
11.2 Materials and methods.....	273
11.2.1 Models software.....	273
11.2.2 Study area and materials	274
11.2.3 Calibration.....	274
11.2.4 Uncertainty assessment.....	279
11.3 Results.....	280
11.3.1 Soft-classified maps.....	280
11.3.1.1 <i>Different approaches</i>	280
11.3.1.2 <i>Internal uncertainty</i>	281
11.3.1.3 <i>Model comparison</i>	284
11.3.2 Hard-classified maps	285
11.3.2.1 <i>Quantity differences</i>	285
11.3.2.2 <i>Allocation algorithms</i>	287
11.3.2.3 <i>Allocation difference</i>	288
11.3.2.4 <i>Pattern difference</i>	289
11.3.3 Validation and outputs	292
11.4 Discussion.....	293
11.4.1 Reflections on the performed analysis.....	293
11.4.2 How each model manage the uncertainty?	294
11.4.3 Can the user control the model and its uncertainties?	298
11.4.4 Can the user understand the model and its uncertainties?	300
11.5 Conclusions.....	301
V. DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES	305
12. DISCUSIÓN GENERAL	307
12.1 La escala como fuente y herramienta para el manejo de la incertidumbre.....	308
12.2 La necesidad de considerar el manejo de la incertidumbre en la conceptualización de la herramienta de análisis.....	310
12.3 Los datos y su papel en la incertidumbre del estudio realizado	312

13. CONCLUSIONES.....	317
VI. NOTAS TÉCNICAS.....	321
A. SOFTWARE DE MODELIZACIÓN	
DEL CAMBIO DE USOS Y COBERTURAS DEL SUELO.....	323
A.1 CA_Markov.....	323
A.1.1 Cálculo de las probabilidades markovianas del cambio de usos y coberturas del suelo.....	325
A.1.2 Creación de los mapas de cambio potencial a partir de la Evaluación Multicriterio.....	326
A.1.3 La simulación.....	327
A.1.4 Validación y opciones extras del modelo.....	329
A.2 Dinamica EGO.....	329
A.2.1 Cálculo de las probabilidades markovianas del cambio de usos y coberturas del suelo.....	330
A.2.2 Creación de los mapas de cambio potencial a partir de los pesos de evidencia.....	332
A.2.3 La simulación a partir de las funciones <i>patcher</i> y <i>expander</i>	334
A.2.4 Validación y opciones adicionales.....	337
A.3 Land Change Modeler.....	338
A.3.1 Cálculo de las probabilidades markovianas del cambio de usos y coberturas del suelo.....	338
A.3.2 El cálculo automático o estadístico de los mapas de cambio potencial.....	339
A.3.3 La localización del cambio.....	341
A.3.4 Validación y opciones adicionales.....	341
A.4 Metronamica.....	342
A.4.1 Definición de las cantidades a similar.....	343
A.4.2 Creación de los mapas de cambio potencial.....	343
A.4.3 Localización del cambio.....	347
A.4.4 Validación y opciones avanzadas.....	348
B. TÉCNICAS Y MÉTODOS.....	351
B.1 Autocorrelación de Moran's I.....	351
B.2 Coeficiente de correlación o correlación de Pearson.....	352
B.1 Estadísticos Kappa.....	353
B.2.1 Kappa.....	354
B.2.2 Fuzzy Kappa.....	355
B.2.3 Kappa Simulation.....	356
B.2.4 Fuzzy Kappa Simulation.....	357
B.3 Fuzzy Numerical.....	358
B.4 LUCC Budget.....	359
B.5 La matriz de Pontius Jr.....	360
B.5.1 Desacuerdo en la cantidad y la localización.....	361
B.5.2 Componentes del desacuerdo en la localización.....	363
B.5 Métricas espaciales.....	364
B.6.1 La base teórica de las métricas espaciales. Su origen en la ecología del paisaje.....	364

B.6.2 Las métricas espaciales como herramienta para el estudio de las relaciones escalares y la calibración y validación de modelos del cambio de usos y coberturas del suelo	366
B.6.3 La oferta de métricas espaciales.	
Tipos de métricas y relación de índices seleccionados.....	367
B.6.3.1 Índices de área, superficie, densidad y variabilidad.....	368
B.6.3.2 Índices de forma	371
B.6.3.3 Índices de distancia, vecindad y conectividad.....	371
REFERENCIAS.....	377
ANEXOS	427
Relación de publicaciones	429
Guion de entrevistas a expertos	433
Material suplementario Capítulo 7	437
Material suplementario Capítulo 8	441

I

**Objetivos y planteamiento
de la investigación**

Capítulo 1

Introducción, contexto y objetivos de la investigación

1.1. INTRODUCCIÓN

La Modelización del Cambio de los Usos y Coberturas del Suelo (*Land Use Cover Change Modelling*, LUCCM) ha experimentado un notable progreso en las últimas décadas, constituyéndose como un tema de investigación destacado y alzándose como una valiosa herramienta, que puede prestar ayuda en el campo de la planificación y la política medioambiental.

Numerosos problemas medioambientales, algunos de los cuales suponen los principales desafíos de nuestra sociedad actual, pueden ser estudiados a través de la LUCCM. Koomen y Stillwell (2007) mencionan algunos de ellos, como pueden ser los procesos de deforestación, la degradación de los suelos, el cambio climático, los procesos de pérdida de biodiversidad o la presión urbana, en relación con las dinámicas de periurbanización. Todos estos problemas guardan una estrecha relación entre sí, que en parte deviene por su vinculación a los usos del suelo y sus cambios.

En una línea similar, Pontius Jr. (2008) resalta la importancia del estudio del cambio terrestre (*Land Change*), en relación con la variación de los usos y coberturas del suelo, por cuanto la mayor parte de estos cambios son a menudo irreversibles desde el punto de vista físico y, por tanto, ocasionan importantes problemas medioambientales. También por la estrecha relación que existe entre los usos del suelo y las opciones de estilos de vida de cualquier individuo. Así, el patrón de localización de las superficies agrícolas, urbanas o de los espacios de vegetación natural tiene una influencia directa en la forma en la que cualquier individuo se comporta. A modo de ejemplo, espacios urbanos fragmentados implican la necesidad de transporte constante, mientras que la fragmentación en el caso de los espacios de vegetación natural impone importantes limitaciones al desarrollo de la biodiversidad y, por tanto, limita el valor medioambiental de estos espacios como lugares de ocio y disfrute.

La significatividad de estos problemas, así como la posibilidad de ser analizados a través de la LUCCM, explica el auge de este tipo de análisis. Estos estudios, si bien en cierta medida novedosos por su enfoque específico (Modelización del Cambio de los Usos y Coberturas del Suelo), entroncan en una tendencia global de conceptualización de la realidad a través de modelos conceptuales. Su origen radica en los propios inicios del entendimiento humano del espacio y de las realidades o fenómenos que sobre este operan. De hecho, O'Sullivan y Perry (2013) señalan como todos llevamos a cabo una conceptualización de la realidad en nuestra vida diaria, en tanto es la única forma que tenemos de procesar su complejidad y la cantidad de información que constituyen los medioambientes y sistemas en los que nos movemos. Del mismo modo, la cartografía

del territorio, cuyo origen puede situarse en el caso de las civilizaciones antiguas (Crone 2000), supone una clara conceptualización del territorio a través de un modelo compuesto por una serie de elementos cartográficos. De esta manera, los modelos son herramientas indispensables para entender el mundo. Nos permiten reducir la enorme complejidad de éste a un conjunto de elementos y relaciones simples, fáciles de entender y asimilar por cualquier individuo.

A diferencia de esos modelos puramente conceptuales, los aquí utilizados quedan caracterizados por su carácter cuantitativo, es decir, por su explicación a partir de un conjunto de reglas y procedimientos estadísticos o matemáticos, entre otros. Sigue existiendo un modelo conceptual de entendimiento de un sistema, espacio o proceso, pero este se traduce en términos cuantitativos, lo que incrementa las posibilidades de análisis y comprensión del objeto de estudio.

Para el caso de la geografía, el análisis del territorio a partir de esta perspectiva tiene su origen a mediados del siglo XX. Se produce entonces el auge de la geografía analítica, como parte de la corriente positivista, y se empieza a considerar la geografía una “ciencia del espacio” (Ortega Valcárcel 2000). Modelos conceptuales anteriores de gran fama, como el de von Thünen o la teoría de los lugares centrales de Christaller, se convierten entonces en puntos de referencia para el entendimiento de la realidad de forma cuantitativa (Ortega Valcárcel 2000). Se traducen así esos modelos en términos matemáticos. Hoy en día, aún continúan siendo una referencia en el estudio y explicación del cambio terrestre (Hersperger et al. 2010) y, de hecho, son vistos por algunos autores como precedentes de los actuales modelos del Cambio de Usos y Coberturas del Suelo (*Land Use Cover Change*, LUCC) (Verburg et al. 2006; Van Vliet et al. 2013b).

No obstante, es partir del desarrollo de la informática y del poder computacional de los ordenadores cuando se produce el definitivo salto de la investigación en modelización. Se da entonces paso a la aparición de un gran número de tipologías de modelos, entre los que podemos señalar los modelos LUCC (Camacho Olmedo et al. 2018a). El poder computacional proporcionado por los equipos informáticos permite ahora llevar a cabo análisis sumamente complejos, que van más allá de las capacidades analíticas de la mente humana. En consecuencia, es posible realizar una representación cuantitativa de la complejidad de los sistemas terrestres, desentrañando las complejas e innumerables relaciones que se producen entre sus distintos elementos, cuyas propiedades son distintas de las que emergen en el sistema global como resultado de todas esas interacciones (Barredo et al. 2003). Hablamos así de la modelización de sistemas complejos y complicados (*complicated systems*) (White 2018).

Gran parte de la literatura académica en el campo de la modelización se ha centrado en la búsqueda del mejor enfoque posible para llevar a cabo la representación y emulación de estos sistemas complejos. Por ejemplo, desde la geografía urbana se han desarrollado numerosos trabajos en esta dirección, en relación a la teoría de los autómatas celulares (Couclelis 1985; Wilson 2000; White et al. 2015). A su vez, estos trabajos no serían posi-

bles sin el desarrollo paralelo de las técnicas de teledetección, tanto aérea como, particularmente, espacial, que han facilitado la aparición de información sobre la superficie terrestre a distintas escalas, tanto espaciales como temporales (White 2018). Las herramientas computacionales han solucionado el problema metodológico, mientras que la teledetección ha proporcionado los datos necesarios.

En conjunto, todo ello ha dado lugar a la aparición de la geomática, entendida como un conglomerado de técnicas computacionales avanzadas que permiten el estudio y análisis de sistemas complejos desde una perspectiva geográfica y medioambiental (Paegelow y Camacho Olmedo 2008b). Ésta nueva rama de investigación, junto al general desarrollo y difusión de todas las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG), ha dado un nuevo auge a la geografía analítica anteriormente apuntada (Ortega Valcárcel 2000), de la que esta tesis supone una nueva aportación.

No obstante, son aún numerosas las críticas a este tipo de aproximación geográfica, especialmente desde el campo de la geografía humana. De este modo, mientras en el caso de la geografía física se ha asumido en mayor grado la utilización de modelos como una herramienta válida de estudio de los fenómenos físicos que operan sobre la superficie terrestre, centrándose el debate en los distintos enfoques y conceptualizaciones manejadas, desde el campo de la geografía humana las críticas han sido más duras y discuten la propia utilidad de la modelización como herramienta para el estudio geográfico del territorio (Perry 2009). A este respecto, son reveladoras algunas de las consideraciones recogidas por Ortega Valcárcel (2000) en relación a la inicial contestación de la geografía analítica o cuantitativa. Habla así Ortega Valcárcel (2000) de una “visión reductora de la racionalidad científica, su completa opacidad de las dimensiones de la realidad que no pueden ser expresadas en lenguaje matemático, su pertinaz filosofía, inconsciente pero tangible, metacientífica, que es el fundamento de su radical acriticismo ideológico, el creciente imperio del individualismo metodológico, en el análisis de los fenómenos sociales, que supone la reducción del individuo a la mera condición de organismo”. Y, con relación a su revitalización actual de la mano de las TIG, plantea que “se tiende a identificar los progresos técnicos con progresos en la disciplina y con cambios en las condiciones del conocimiento. Es decir, se atribuye la técnica de carácter de registro inmediato e incontrovertible a la realidad de los hechos”, lo que acentúa “la tendencia a reforzar el realismo ingenuo que subyace en el empirismo tradicional. Esto es, la creencia en que los datos obtenidos y manipulados (de forma más o menos sofisticada) por estos procedimientos técnicos avanzados constituyen, por sí mismos, la base directa del conocimiento geográfico”.

Pese a ello, es creciente la investigación geográfica, tanto física como humana, que hace uso de las nuevas tecnologías y esa visión analítica, así como el papel que estas desempeñan en la formación del geógrafo y en su rol dentro del mercado laboral (Gómez Mendoza 2013; Maurín Álvarez 2014). Pruebas de lo primero son la labor desarrollada por el Grupo de Tecnologías de la Información Geográfica de la Asociación de Geógrafos Españoles y su revista, *Geofocus*, así como las publicaciones de algunas de las revistas

de geografía de cabecera, como *Applied Geography* o *International Journal of Geographical Information Science*.

Esta tesis, aún reconociendo las limitaciones de las TIG y sus análisis asociados, como la modelización, plantea un aporte fundamentalmente metodológico en relación con la forma en la que estas herramientas son utilizadas, haciendo especial hincapié en su respaldo conceptual, que se encuentra vinculado a la forma en la que la realidad estudiada es conceptualizada y, por tanto, simplificada. De esta manera, sin aspirar a convertir el empirismo geomático en una religión, pretendemos plantear sus limitaciones, en relación con las principales incertidumbres asociadas a este tipo de estudios, de tal manera que cualquier usuario pueda ser consciente de los límites de sus análisis. Sin embargo, no ponemos sistemáticamente en duda su utilidad, por cuanto tales tecnologías, como hemos previamente apuntado, nos ofrecen nuevas y poderosas vías de análisis de la realidad geográfica, capaces de desentrañar relaciones y procesos reales, difíciles de estudiar mediante otro tipo de enfoques.

En relación con el punto anterior, la geografía, en su estudio del mundo real, necesita comprender y encontrar explicación a los complejos y complicados sistemas que componen la realidad analizada. Éstos son sistemas lejos del equilibrio termodinámico y para cuya evolución no existen, por tanto, certezas (White 2018). La modelización supone en este sentido una interesante línea de trabajo, por cuanto permite plantear una serie de desarrollos plausibles de ese sistema, en función de los criterios y asunciones realizadas por el usuario, es decir, por el modelador. De esta manera, el papel esencial de la modelización se ubica en su capacidad para dar luz sobre hipotéticos desarrollos de un sistema complejo que, por tal condición, resulta imposible de predecir. Es decir, sirve como herramienta para comprender un sistema y su posible evolución, así como, en el caso de la LUCCM, las consecuencias asociadas a los principales cambios terrestres (National Research Council 2014).

En relación con ello, los resultados de los ejercicios de modelización se han planteado como una herramienta de notable utilidad en el campo de la planificación, es decir, de la toma de decisiones (*decision-making*) (Sohl y Claggett 2013; Elsayah et al. 2017). La modelización permite a los agentes encargados de planificar el territorio contar con la representación espacial de cómo el sistema a planificar puede evolucionar a futuro bajo distintas hipótesis, lo que sin duda le servirá de ayuda en la toma de sus decisiones. Permite, en definitiva, acercar el conocimiento académico al campo práctico de la planificación (Van Delden et al. 2011).

Sin embargo, todos los ejercicios de modelización y, en general, cualquier análisis geoespacial, se encuentran afectados por un gran número de incertidumbres. Éstas pueden afectar a nuestro entendimiento del sistema analizado y, por tanto, a las decisiones prácticas tomadas en base a las conclusiones de esos análisis (Li y Wu 2006; Warmink et al. 2010; Kozak et al. 2017).

La comprensión de las incertidumbres asociadas a cualquier ejercicio de modelización resulta así una tarea fundamental, de cara a maximizar la utilidad de estos análisis. Esta

tarea no ha recibido, sin embargo, la suficiente atención, especialmente en lo referido a los modelos LUCC. Sigue siendo un campo no explorado completamente y en el que aún falta una profunda labor de investigación. De hecho, son numerosos los estudios que han planteado el análisis de la incertidumbre como una de las líneas de trabajo prioritarias en el campo de la LUCCM (Pontius Jr. 2008; Sohl y Claggett 2013). Especialmente en relación con la necesidad de validar los modelos para conocer las incertidumbres y errores asociados a cada aplicación (Verburg et al. 2006; Brown et al. 2013; Paegelow et al. 2013).

Si bien existen numerosos trabajos que asientan el marco teórico de la LUCCM (Verburg et al. 2006; Eric et al. 2007; Paegelow y Camacho Olmedo 2008a; Van Delden et al. 2011; Van Schrojenstein Lantman et al. 2011; National Research Council 2014; Camacho Olmedo et al. 2018b), escasos y poco ambiciosos han sido los esfuerzos orientados a realizar una caracterización general de la incertidumbre en el campo de la modelización LUCC (Yeh y Li 2006). En el mejor de los casos, estos esfuerzos se han centrado en planeamientos genéricos, como parte de marcos teóricos sobre la incertidumbre para el conjunto de la modelización o, incluso, de los análisis geoespaciales (Van Asselt 2000; Fisher 2005; Lowell 2008; Matott et al. 2009; Maier et al. 2016).

Parte de los análisis de la incertidumbre en el campo de la modelización han quedado asociados a la problemática de la escala, sinónimo del grado de abstracción alcanzado por el modelo y, por ende, relacionada con la incertidumbre asociada a la conceptualización del objeto de estudio (Kocabas y Dragicevic 2006; Samat 2006; Verburg et al. 2007; Pan et al. 2010). En este sentido, la escala también ha sido planteada en varias ocasiones como una línea de investigación prioritaria en la LUCCM (Verburg et al. 2004; National Research Council 2014).

Si bien existen un gran número de estudios que abordan este campo de investigación de manera parcial, faltan también para esta temática análisis generales que estudien, de manera holística, el problema de la escala en la LUCCM, vinculándola a la incertidumbre que introduce en los procesos de modelización.

La escala resulta espacialmente importante por cuanto se trata de un elemento clave de la conceptualización que efectuamos del espacio. De hecho, por tal condición, siempre ha constituido un concepto central en la disciplina geográfica (Watson 1978). En este sentido, planteamos aquí la necesidad de su estudio, no solo por su influencia en los resultados de los análisis realizados sino, especialmente, por su vinculación con los modelos conceptuales manejados por los usuarios de la LUCCM.

Por tanto, recogiendo parte de las críticas de Ortega Valcárcel (2000), se defiende aquí el estudio y análisis de las incertidumbres y, vinculado a ellas, de la escala, como marco conceptual que nos ayude a definir la utilidad de nuestros ejercicios de modelización y, especialmente, sus limitaciones. Se trata así de determinar el interés y valor de los estudios geoespaciales, como la LUCCM, sin caer en ese realismo ingenuo del que hablaba Ortega Valcárcel (2000). En este sentido, las conclusiones de esta tesis pretenden ayudar, no sólo a aquellos interesados en el campo de la modelización, sino también a cualquier usuario de las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG).

En conclusión, esta investigación tiene como objetivo llevar a cabo una caracterización general de las fuentes de incertidumbre en la Modelización del Cambio de los Usos y Coberturas del Suelo, abordando éstas de manera integral, y prestando una especial atención a aquellas incertidumbres asociadas a la elección de la escala empleada.

Si bien una caracterización total de todas las fuentes de incertidumbre en la LUCCM resulta imposible y supera, con mucho, los objetivos de esta tesis, el estudio que aquí se presenta pretende servir como una primera aproximación. En ella, se combina un planeamiento teórico inicial, que aborda los temas aquí planteados desde una perspectiva general e integrada, junto a análisis prácticos, que muestran, para un área de estudio específica, las principales fuentes de incertidumbre asociadas a un ejercicio de modelización.

1.2. CONTEXTO DE LA INVESTIGACIÓN

Esta tesis forma parte de los resultados del proyecto de investigación SIGEOMOD_2020 (BIA2013-43462-P)¹, que a su vez es la continuación del proyecto de investigación SIGEOMOD (BIA2008-00681)². Antecedentes de ambos son los proyectos “Dynamiques et modélisations de l’occupation du sol appliquées aux anthroposystèmes montagnards méditerranéens: Pyrénées – Sierra Nevada”, “Sistemas de Información Geográfica y modelización de la dinámica paisajística de la montaña mediterránea: Sierra Nevada y Pirineos Orientales franceses” y “Modélisations prospectives de l’occupation du sol par approches géomatiques et statistique”.

Todos estos proyectos han compartido líneas de trabajo comunes, especialmente en el caso de los dos primeros. En este sentido, entre sus objetivos más destacados, que también quedan incorporados en esta tesis, se encuentran el avance general en el conocimiento de la Modelización del Cambio de los Usos y Coberturas del Suelo (*Land Use Cover Change Modelling*, LUCCM); la comparación de las aportaciones de los diferentes software de modelización, precisando su complementariedad; la validación del grado de ajuste de los modelos según diferentes parámetros y estrategias de calibración; y el incremento de la base de datos temática.

Como resultado de los proyectos mencionados, se han publicado dos libros en Springer, en los años 2008 (Paegelow y Camacho Olmedo 2008a) y 2018 (Camacho Olmedo et al. 2018a), los cuales sientan parte de la base teórica de la LUCCM. También se ha coordinado un número especial en la revista *International Journal of Geographical Information Science* (Paegelow et al. 2013), que incluye ciertos análisis específicos sobre la incertidumbre. De hecho, en el editorial de este número se considera la incertidumbre, en relación a la precisión y acierto de los modelos, como una importante línea de trabajo (Paegelow et al. 2013).

¹ <http://geofireg.ugr.es/sigeomod/>

² www.ugr.es/~sigeomod/

Esta investigación supone una continuación de estos esfuerzos, a partir de la construcción de un marco teórico sobre la incertidumbre en la LUCCM; aspecto que solo se ha abordado de manera parcial en las obras mencionadas. Obras generales sobre modelización, que prestan cierta atención al problema de la incertidumbre y que, por tanto, quedan también vinculadas a lo planteado en esta tesis, son los libros editados por O'Sullivan y Perry (2013) y Wainwright y Mulligan (2013), así como el informe elaborado por el National Research Council (2014). Para España, destacan los trabajos desarrollados desde la Universidad de Alcalá, centrados en el estudio de la incertidumbre y, de manera específica, en los análisis de sensibilidad (Gómez Delgado y Bosque Sendra 2004a, b; Barreira González et al. 2012; Plata Rocha et al. 2012). Chris Pettit, bajo cuya supervisión el doctorando ha realizado una estancia de tres meses en el centro *City Futures* (UNSW) ha trabajado también en temas relacionados con la incertidumbre (Keogh et al. 2007; Benke et al. 2011; Nino-Ruiz et al. 2013).

Gran parte de los esfuerzos llevados a cabo por el equipo de investigación del proyecto SIGEOMOD_2020 se han orientado a la comparación de diferentes software de modelización (Villa et al. 2007; Mas et al. 2011, 2014; Pérez-Vega et al. 2012; Camacho Olmedo et al. 2013, 2015; Maestripieri y Paegelow 2013; Díaz-Pacheco y Hewitt 2014; Abuelaish y Camacho Olmedo 2016). Esta tesis da continuidad a tal línea de trabajo a partir de un enfoque de estudio principalmente centrado en el análisis de la incertidumbre vinculada a cada uno de los software de modelización estudiados. Se introducen, además, nuevos modelos de amplia difusión y uso en la comparación.

Los software de modelización comparados coinciden con los desarrollados por las entidades interesadas en los resultados del proyecto: el Centro de Sensoriamiento Remoto de la Universidad Federal de Minas Gerais (Brasil), la School of Geography de la Clark University (EEUU) y el Research Institute for Knowledge Systems (RIKS) (Países Bajos). En este último ha desarrollado el doctorando una estancia de investigación de un mes, que queda plasmada en algunas de las colaboraciones que conforman parte de los artículos y capítulos de libro de esta tesis.

La actividad desarrollada por parte de otros de los miembros y entidades interesadas en los resultados del proyecto se encuentra también vinculada al RIKS. Cabe mencionar al respecto el modelo APoLUS propuesto por Hewitt (2018), así como las publicaciones de este autor que utilizan Metronamica como software de modelización (Hewitt et al. 2014; Hewitt y Díaz-Pacheco 2017; Díaz-Pacheco et al. 2018). También cabe apuntar el modelo MOLAND, desarrollado por el Joint Research Centre de la Unión Europea y descrito por Barredo et al. (2003).

Otros modelos LUCC comúnmente empleados que, sin embargo, no han sido utilizados en esta investigación, son CLUMondo (Van Vliet y Verburg 2018) y SLEUTH (Clarke 2018). Detrás de ellos se encuentran dos de los grupos de investigación más relevantes en el campo de la LUCCM. El liderado por Verburg desde la Vrije Universiteit Amsterdam y el encabezado por Clarke desde la University of California, Santa Barbara. Ambos han desarrollado también trabajos relacionados con la incertidumbre en la

LUCCM (Aerts et al. 2003; Messina et al. 2008; Klein Goldewijk and Verburg 2013; Verburg et al. 2013; Alexander et al. 2015; Prestele et al. 2016; Şalap-Ayça et al. 2018).

No obstante, en lo referido al primer caso, cabe destacar los trabajos relacionados con las técnicas de calibración y validación de modelos LULC liderados por Van Vliet (Van Vliet et al. 2011, 2013a, 2016). Con una temática similar, son relevantes las publicaciones de Pontius Jr. (Pontius Jr. 2000; Pontius Jr. et al. 2004b, a, 2008, 2011; Pontius Jr. y Cheuk 2006; Pontius Jr. y Millones 2011; Pontius Jr. y Santacruz 2014; Pontius Jr y Parmentier 2014), que lidera otro de los grupos internacionalmente más destacados en el campo de la LUCCM.

A nivel español, además del grupo de investigación ya mencionado de la Universidad de Alcalá³, cabe mencionar los trabajos promovidos y participados por Martínez-Vega desde el CSIC (Vilar et al. 2016; Martínez-Vega et al. 2017; Gallardo and Martínez-Vega 2018). También el grupo liderado por Santé en la Universidad de Santiago de Compostela (Santé et al. 2010; García et al. 2011). De estos grupos, junto al proyecto en el que se integra esta tesis, provienen la mayor parte de las tesis doctorales más recientes defendidas en el campo de la LUCCM en España (Gallardo Beltrán 2014; Hewitt 2014; Barreira González 2017; Basheer 2017; de Carvalho Cantergiani 2017).

Finalmente, en el estudio de la incertidumbre de la LUCCM, esta investigación ha prestado especial atención al papel jugado por la escala de análisis. Para tal campo de investigación, son referentes los trabajos desarrollados, entre otros, por Goodchild (Goodchild 2001, 2011), Marceau (Marceau 1999; Ménard y Marceau 2005; Marceau et al. 2013; Wang y Marceau 2013), Quattrochi (Quattrochi y Goodchild 1997a, b; Quattrochi et al. 2001) y Wu (Jenerette y Wu 1997; Wu y Qi 2000; Wu et al. 2002, 2006, Wu 2004, 2007, Wu y Harbin 2006a, b; Buyantuyev y Wu 2007; Wu y Li 2009; Buyantuyev et al. 2010; Ma et al. 2016). Cabe destacar también las líneas de investigación de Lloyd (Lloyd 2014, 2015), bajo cuya supervisión ha realizado el autor de esta tesis una estancia de tres meses en la Universidad de Liverpool.

Con todo, esta investigación da continuidad a las líneas de trabajo iniciadas desde hace años por parte de los miembros del proyecto de investigación en el que se inscribe la presente tesis, bajo cuyo auspicio queda financiada (Contratos predoctorales para la formación de doctores 2014). No obstante, se aporta aquí un nuevo enfoque, en relación con la incertidumbre y, como parte de esta, de la escala de análisis, el cual no ha recibido una atención específica en trabajos anteriores del equipo de investigación que conforma el mencionado proyecto.

1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

Un modelo del Cambio de los Usos y Coberturas del Suelo (*Land Use Cover Change*, LUCC), en tanto que conceptualización de un determinado sistema territorial, es una simplificación de la realidad que, por tanto, conlleva un cierto grado de incertidumbre.

³ https://portal.uah.es/portal/page/portal/grupos_de_investigacion/97/

El grado de incertidumbre de cualquier ejercicio de modelización viene determinado, entre otros elementos, por la forma en la que la realidad es conceptualizada por el modelador, en relación con la escala o escalas de análisis, las limitaciones técnicas del propio modelo (software), los datos utilizados y la parametrización y validación del modelo.

Aunque esta incertidumbre resulta inevitable, el usuario cuenta con herramientas para su control y comunicación. En este sentido, resulta necesario realizar un adecuado análisis del objeto de estudio, de cara a entender sus características y particularidades. Con tal información, el usuario puede reducir al mínimo las incertidumbres derivadas de la conceptualización del elemento estudiado, según la escala o escalas empleadas, y de los análisis realizados a partir de tal modelo conceptual y su gemelo cuantitativo.

1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Con el fin de comprobar la hipótesis anterior, el objetivo principal de esta tesis pasa por llevar a cabo una caracterización global de las fuentes de incertidumbre en la Modelización del Cambio de los Usos y Coberturas del Suelo (*Land Use Cover Change Modelling*, LUCCM), prestando especial atención a aquellas derivadas de la elección de la escala o escalas de análisis y, por tanto, conectadas con la forma en la que el objeto de estudio es conceptualizado.

De manera concreta, el cumplimiento de ese objetivo general se desgrana en la consecución de los siguientes objetivos secundarios:

1. Desarrollar el marco conceptual necesario para el entendimiento de la LUCCM, así como de las incertidumbres vinculadas a este tipo de análisis.
 - a. Definir los conceptos fundamentales de la LUCCM, en relación con su significado, utilidad, herramientas empleadas y flujo habitual de trabajo.
 - b. Caracterizar, de forma general, las distintas fuentes de incertidumbres asociadas a un ejercicio de modelización LUCC, así como su vinculación a las fuentes de incertidumbre propias de cualquier análisis geoespacial.
2. Proponer un marco teórico para el estudio de la escala en los análisis espaciales, considerando particularmente el papel que juega la escala en el caso de la LUCCM.
3. Caracterizar geográficamente el área de estudio escogida para llevar a cabo los ejercicios de modelización, analizando su sistema territorial, así como los cambios en los usos y coberturas del suelo que se han producido en las últimas décadas.
4. Establecer una relación de las bases de datos de Usos y Coberturas del Suelo (*Land Use Land Cover*, LULC) disponibles para el estudio del cambio LULC en el área de estudio elegida.
5. Estudiar la incertidumbre asociada a las fuentes LULC empleadas en los ejercicios de modelización.
6. Estudiar la incertidumbre asociada a la escala o escalas empleadas en un ejercicio de modelización LUCC.

- a. Analizar la influencia de la escala cartográfica y la unidad mínima cartografiada en la simulación de un modelo LUCC.
 - b. Analizar la influencia de la resolución temática en la calibración de un modelo LUCC.
7. Estudiar, de forma global, la incertidumbre asociada al uso de los distintos software de modelización, a partir de la comparación de su aplicación para una misma área de estudio.

1.5. ESTRUCTURA DE LA INVESTIGACIÓN

Este trabajo se encuentra estructurado en cinco grandes bloques, de diferente alcance y temática (Fig. 1.1). El primer bloque supone una introducción general a la investigación. En él se plantean la hipótesis y objetivos del trabajo y se caracteriza el área de estudio, así como las principales fuentes y métodos empleados en los análisis que conforman la segunda parte de la tesis doctoral.

El segundo bloque es de carácter teórico. Asienta la base conceptual sobre la que se desarrollan los análisis realizados en los dos siguientes bloques. El primer capítulo se plantea como una introducción al campo de la LUCCM. En él se relatan parte de los conceptos fundamentales a los que se hace referencia a lo largo de toda la investigación, en tanto esta tiene por principal campo de estudio la LUCCM. A continuación, se realiza una introducción conceptual a la incertidumbre en los análisis geoespaciales, indicándose las principales fuentes de incertidumbre que podemos encontrar en éstos. Algunas de ellas son posteriormente abordadas en profundidad en la segunda parte de esta investigación. Finalmente, el tercer capítulo de este bloque asienta el marco conceptual seguido para el análisis de la escala, como componente esencial en el estudio de la incertidumbre.

Los dos siguientes bloques analizan en mayor profundidad la incertidumbre asociada a las bases de datos LULC y a la modelización LUCC. En el primero de los dos bloques, el capítulo inicial realiza una caracterización general de las distintas bases de datos espaciales LULC actualmente disponibles, haciendo también referencia a sus incertidumbres. El segundo capítulo analiza, en detalle, la incertidumbre de una de las principales bases de datos LULC hoy en día disponibles para Europa (CORINE Land Cover), la cual es empleada en los análisis realizados como parte del bloque III de la investigación. En este último bloque, se realiza un análisis de las distintas fuentes de incertidumbre en la LUCCM, ya sea a partir de dos componentes de la escala o bien en relación con el software de modelización escogido.

Finalmente, el último bloque incluye una discusión general de toda la investigación, así como sus conclusiones. Este bloque actúa como punto de unión de toda la tesis, en relación con el objetivo planteado de llevar a cabo una caracterización general de la incertidumbre en la LUCCM. Frente a las discusiones y conclusiones específicas de cada capítulo, la discusión final proporciona una visión general del problema de la incertidumbre en la LUCCM, superando las limitaciones de esfuerzos parciales sobre el estudio y caracterización de la misma. En este sentido, se considera que esa compartimentación del

estudio y análisis de la incertidumbre es, precisamente, una de las principales debilidades de la investigación en este campo.

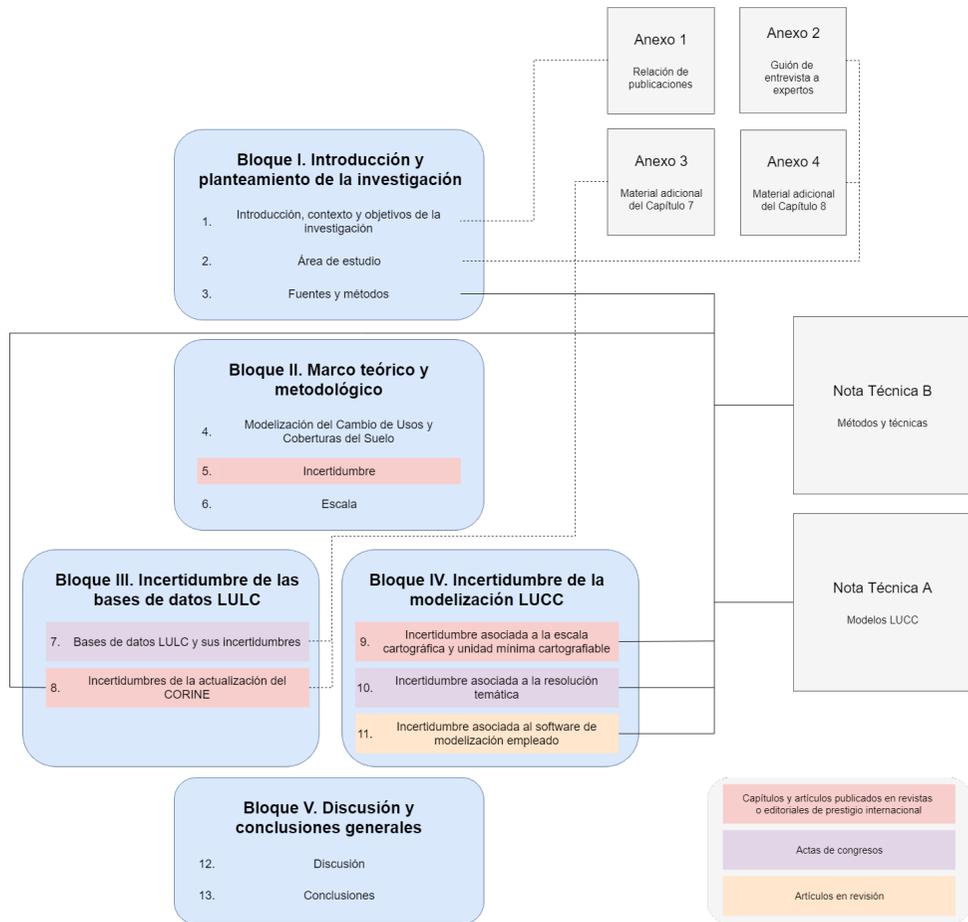


Figura 1.1. Organigrama de esta investigación

La investigación concluye con dos notas técnicas en las que se relatan, con sumo detalle, los modelos, métodos y técnicas empleados en los análisis efectuados como parte de esta tesis. Si bien cada capítulo los caracteriza de manera breve, se remite al lector a estos anexos en el caso de que necesite contar con más información o esta le resulte insuficiente. De manera adicional, se incluyen cuatro anexos, que proporcionan información extra sobre algunos de los aspectos concretos de la investigación: la relación de publicaciones que forman parte de esta tesis doctoral e información complementaria a la incluida en los capítulos 3, 7 y 8.

Parte de la información mostrada en cada uno de los bloques e, incluso, en cada capítulo, se solapa con la abordada en otras partes de esta investigación. De este modo,

parte de esta tesis surge de la compilación de varias publicaciones⁴ y con el objetivo de servir como marco de referencia para un amplio número de investigadores, y no únicamente aquellos que trabajan en el campo de la LUCCM. En este sentido, se ha intentado, sin perder la visión y coherencia de conjunto, presentar una investigación en la que, si bien el total es lo relevante, el lector interesado pueda recurrir a cada capítulo de manera individualizada, encontrando en él toda la información necesaria para su tema de interés.

⁴ Esta tesis ha sido realizada de un modo tradicional, de acuerdo con las pautas marcadas por la normativa de la Universidad de Granada para la presentación de una tesis doctoral. No obstante, parte de la misma se corresponde con el contenido de varios trabajos ya publicados por el doctorando en colaboración con otros investigadores. La versión actualizada de estos se acompaña de otro conjunto de capítulos inéditos, que terminan de dar forma al conjunto de la investigación propuesta.

Capítulo 2

Área de estudio

2.1. INTRODUCCIÓN

El Área Central de Asturias (ACA) es el ámbito de estudio elegido para realizar los ejercicios de modelización que componen esta investigación. Se trata del espacio con mayor dinamismo territorial de Asturias (Rodríguez Gutiérrez y Menéndez Fernández 2005). Además, es objeto de debate constante, siendo ampliamente reconocida la necesidad de llevar a cabo su ordenación (Maurín Álvarez 2011; Gobierno del Principado de Asturias 2016).

Para proceder a una adecuada planificación de este territorio, un paso fundamental pasa por la comprensión de los cambios territoriales que afectan al mismo. Cabe comprender qué cambios se han producido y los procesos que han guiado éstos. Una vez se ha adquirido tal conocimiento, se puede entender el sistema de estudio en un modo que sea posible replicarlo de forma teórica y, en consecuencia, testar posibles hipótesis de evolución futura. Éstas pueden servir en el proceso de toma de decisiones sobre las políticas a implementar en este espacio, de cara a lograr un mayor equilibrio territorial del mismo. También para alcanzar el objetivo de ordenar adecuadamente las actividades y población que alberga este espacio.

En las siguientes líneas, realizamos una detallada caracterización del Área Central de Asturias. Consideramos ésta indispensable para la generación de un buen ejercicio de modelización. De este modo, la producción del modelo conceptual del espacio analizado se sustenta en la caracterización que del mismo se haga.

En primer lugar, se efectúa una aproximación al reconocimiento académico e institucional del ACA como un espacio con entidad propia y cierta singularidad. Su definición ha sido objeto de numerosas propuestas, sin que exista un criterio único para proceder a la misma. Este apartado justifica, por tanto, la delimitación del ámbito de estudio empleada en la realización de esta tesis.

A continuación, se detallan las características del sistema territorial del ACA, de cara a entender sus elementos constituyentes y procesos estructurantes, así como para conocer las relaciones que se establecen entre ellos, que determinan los cambios en los usos y coberturas del suelo. Finalmente, se realiza un breve análisis de los cambios de los usos y coberturas del suelo que se han producido recientemente, en las últimas décadas. Se trata de un paso vital, por cuando estos cambios constituyen la base sobre la que se han calibrado y validado los ejercicios de modelización de esta tesis.

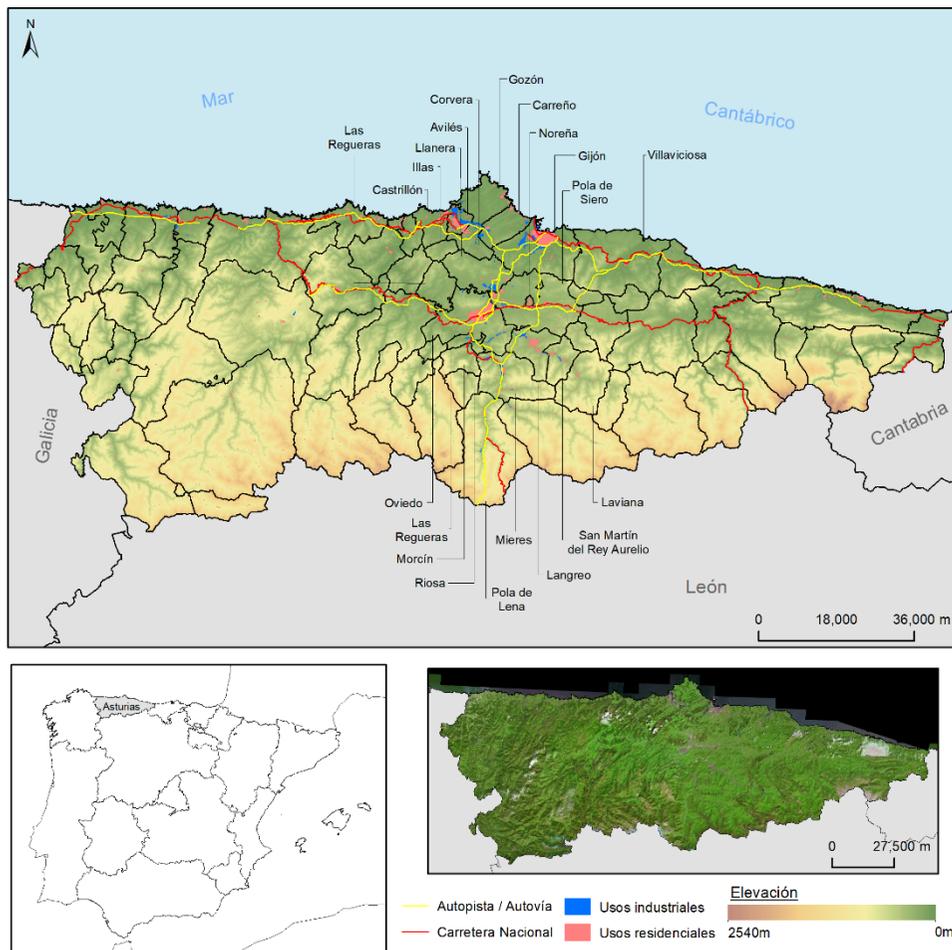


Figura 2.1. Mapa topográfico e imagen satélite de Asturias. Se identifican los concejos de la región a los que se hace referencia a lo largo de este capítulo. Además, se incluye el mapa de localización de Asturias en el conjunto de España. Fuentes: Mapa Topográfico Nacional 1:200.000; MDT200m; Cartografía SIANE; Líneas límite municipales; PNOA Máxima Actualidad (IGN)

2.2. EL ÁREA CENTRAL DE ASTURIAS (ACA) COMO REALIDAD GEOGRÁFICA Y ADMINISTRATIVA. EL PROBLEMA DE SU DELIMITACIÓN

Ya desde mediados del siglo XX, paralelo a los primeros intentos de la planificación y ordenación territorial en España (Bielza de Ory 2008), tenemos constancia del reconocimiento del ACA como un sistema territorial diferenciado (Dirección General de Urbanismo 1964), fundamentalmente caracterizado por la concentración de las actividades urbanas e industriales de la región.

Rodríguez Gutiérrez et al. (2009) llevan este reconocimiento atrás en el tiempo hasta 1927, cuando Idelfonso Sánchez del Río proyecta una autopista para unir Gijón con Oviedo, en una clara visión metropolitana del conjunto urbano del centro de Asturias. Tal y como recogen los autores, el proyecto preveía la reserva de suelo en los laterales de la autopista para la urbanización de la misma, en un intento de convertir ésta en “una verdadera y espléndida calle urbanizada entre Oviedo y Gijón” (Rodríguez Gutiérrez et al. 2009).

Desde entonces, numerosos documentos técnicos, pero también académicos, han reconocido la singularidad territorial del centro de Asturias respecto al conjunto de la región. No obstante, aún no se ha logrado un consenso en la definición de sus límites, objeto de numerosas propuestas (Carrero de Roa 2012; García Oviedo et al. 2013). En las siguientes líneas, hacemos un repaso de las diferentes formas en las que el ACA ha sido delimitada con el paso de los años.

2.2.1. EL RECONOCIMIENTO ACADÉMICO

El estudio del sistema territorial asturiano y, como parte singular del mismo, del ACA, queda vinculado a la actividad desarrollada por el departamento de Geografía de la Universidad de Oviedo (Rodríguez Gutiérrez et al. 2009). Éste se establece de manera estable en el curso 1970-71, bajo la dirección de Francisco Quirós Linares (Quirós Linares 1980). Desde entonces, empiezan a formularse los primeros análisis del sistema territorial asturiano y, específicamente, se realizan las primeras consideraciones del Área Central como un ámbito territorial de características singulares y, por consiguiente, objeto de ordenación específica.

Es Emilio Murcia Navarro el autor de las primeras publicaciones académicas sobre el sistema urbano asturiano. En ellas plantea la existencia de una dinámica metropolitana en el centro de la región (Murcia Navarro 1977), que acaba por considerar como un área funcionalmente autónoma dentro del conjunto de Asturias (Murcia Navarro 1980). En este sentido, basándose en el análisis cuantitativo de los municipios de la zona central de Asturias desarrollado por Pérez y Martínez (1974), Murcia plantea la existencia de un área central integrada, entendida como “un ente complejo de carácter urbano-rural, compuesto de elementos diversos especializados en distintas funciones, capaz de funcionar autónomamente con respecto al resto de la región” (Murcia Navarro 1980).

Continuación de los trabajos iniciados por el anterior, José Ramón Fernández Prieto (Fernández Prieto 1982), junto con Gaspar Fernández Cuesta (Fernández Prieto y Fernández Cuesta 1991) inciden en las tesis desarrolladas por Murcia. Consideran el sistema urbano asturiano como uno claramente jerarquizado y en el que sobresale una zona central, diferenciada del resto de la región en términos demográficos y de actividad económica. De este modo, ambos autores abordan ya la definición de Asturias a partir de la

contraposición de un área central dinámica, aglutinadora de población y actividad económica, frente a unas alas rurales en paulatino retroceso (Fig. 2.2) (Fernández Prieto y Fernández Cuesta 1991).

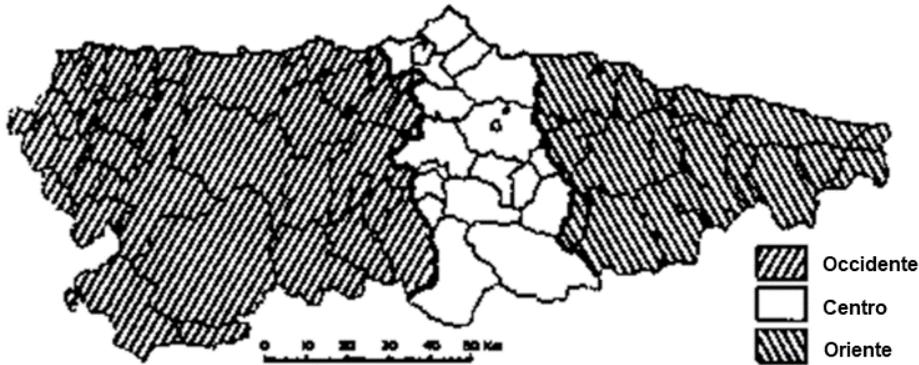


Figura 2.2. Delimitación de Asturias en dos sectores (centro y alas) propuesta por Fernández Prieto y Fernández Cuesta (1991). Fuente: tomado de Fernández Prieto y Fernández Cuesta (1991)

Como parte de compendios generales de análisis y caracterización de la geografía asturiana, varios autores plantean también para esos años el reconocimiento del ACA como una realidad territorial diferenciada y con dinámicas propias. Quirós Linares (1982) interpreta el conjunto de ciudades del ACA como “un único espacio urbano fragmentado en varios elementos, cada uno de los cuales tiene asignada una función diferenciada”.

Morales Matos y Alvargonzález Rodríguez (1990) proponen un sistema del Área Central, como parte del sistema urbano asturiano, integrado por los municipios de Gijón, Oviedo, Avilés, Langreo-San Martín del Rey Aurelio y Mieres-Aller. Lo asimilan a las características propias de las áreas metropolitanas polinucleares, caracterizándolo a partir de la gran integración de sus actividades económicas y urbanas. Cortizo Álvarez et al. (1990) distinguen un área central de dinámica contrapuesta al resto de la región. En relación con el desarrollo industrial de este ámbito, hablan del “ocho asturiano”, conformado por Avilés, Gijón, Oviedo, Mieres y Langreo. Maurín Álvarez (1992a) se refiere también al ocho asturiano a la hora de definir el área central de la región, caracterizada por el desarrollo económico y demográfico. Sin embargo, a diferencia de los anteriores, plantea una transición desde el modelo del ocho al del triángulo Oviedo-Gijón-Avilés. De este modo, el dinamismo económico y demográfico ya no se sitúa en toda la zona central de Asturias, sino únicamente en su parte septentrional. Se trata de algo ya apuntado décadas antes por Bulnes (1966) y que reconoce también Cortizo Álvarez (1992). No obstante, recupera este último la idea del ACA, incluyendo las Cuencas Mineras, para plantear la posibilidad de su consideración como área metropolitana.

Es a finales del siglo XX, con los postulados de Fermín Rodríguez y el centro de investigación que entonces dirige (Centro de Cooperación y Desarrollo Territorial), cuando definitivamente se pasa de la identificación y caracterización geográfica del Área

Central como ámbito singular, a su proposición como espacio urbano e industrial objeto de ordenación bajo la consideración de área metropolitana (Carrero de Roa 2011).

En esta línea, Rodríguez Gutiérrez y Menéndez Fernández (1999) definieron el ACA como “Ciudad Astur” y plantearon una delimitación concreta de la misma (Fig. 2.3). El propósito pasaba por la consideración conjunta del ACA como un área metropolitana, objeto de políticas de ordenación y desarrollo regional propias, en relación con su papel como una de las principales aglomeraciones urbanas del país.

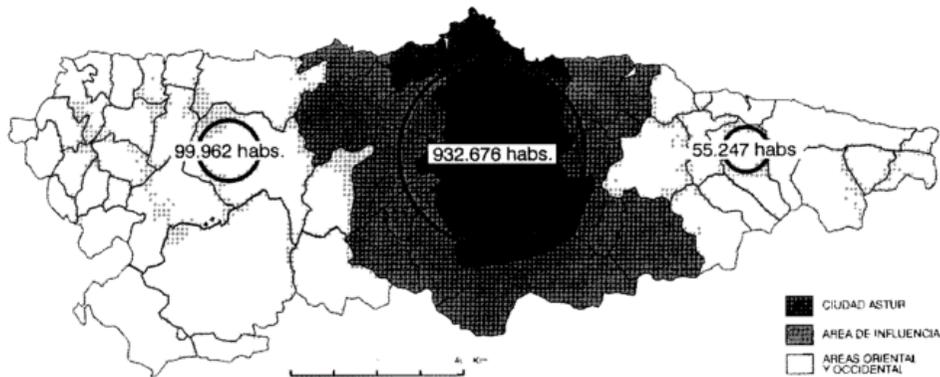


Figura 2.3. Delimitación de la Ciudad Astur propuesta por Rodríguez Gutiérrez y Menéndez Fernández (1999), así como de su área de influencia. Fuente: tomado de Rodríguez Gutiérrez y Menéndez Fernández (1999)

Los autores han continuado desarrollando de manera más profusa tales ideas con posterioridad (Rodríguez Gutiérrez y Menéndez Fernández 2000, 2003, 2005, 2010, Rodríguez Gutiérrez et al. 2009, 2013). Éstas han sido complementadas por las aportaciones de investigadores afines al mismo grupo de investigación, como Manuel Carrero de Roa (Carrero de Roa 2011, 2012; Rodríguez Gutiérrez y Carrero de Roa 2013). Éste, realiza en su tesis doctoral una recopilación de las diferentes delimitaciones propuestas para la definición del área metropolitana de Asturias, concluyendo con la proposición de una nueva delimitación del fenómeno metropolitano en Asturias a partir del análisis de varias variables espaciales a escala parroquial (Fig. 2.4) (Carrero de Roa 2011).

Paralelo a los trabajos desarrollados desde el CeCoDeT (Centro de Cooperación y Desarrollo Territorial), liderados por Fermín Gutiérrez, el grupo REGIOLab, encabezado por Fernando Rubiera Morollón, ha venido prestando también una creciente atención al estudio del ACA. Dando por sentada su consideración como área metropolitana, los estudios de este grupo de investigación han perseguido la caracterización del ACA desde distintos puntos de vista, como los mercados de trabajo que la componen (Fig. 2.5) o la incidencia en este ámbito de la dispersión urbana (Rubiera Morollón y Viñuela Jiménez 2012; González Marroquín 2014; González Marroquín et al. 2014). Las conclusiones señalan siempre a la necesidad de la gestión de este ámbito desde un punto de vista

metropolitano, si bien no teniendo por qué adoptar ninguna figura administrativa o jurídica nueva.

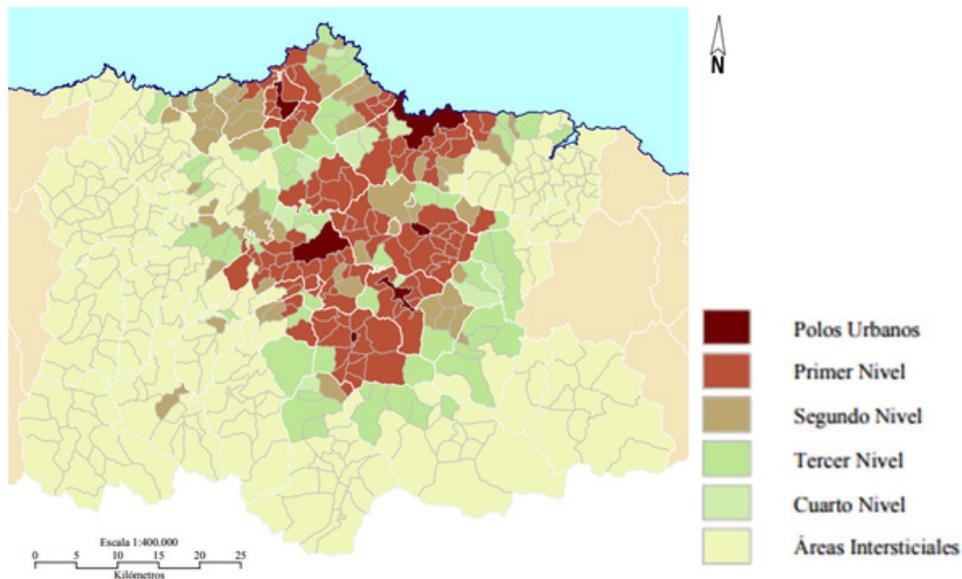


Figura 2.4. Delimitación del área metropolitana de Asturias propuesta por Carrero de Roa (2011). Se encuentra realizada a nivel parroquial. Distingue distintos tipos de parroquias, en función del nivel de funcionalidad metropolitana que posean. En este sentido, las áreas intersticiales se definen como espacios “representativos del carácter discontinuo y “poroso” del área metropolitana asturiana”. Fuente: tomado de Carrero de Roa (2011)



Figura 2.5. Sistemas locales de trabajo identificados para el conjunto de Asturias en el año 2010 por parte de Rubiera Morollón y Viñuela Jiménez (2012). Este trabajo ha llegado a ser planteado en la prensa como una propuesta de redefinición del mapa municipal de Asturias. Fuente: tomado de Rubiera Morollón y Viñuela Jiménez (2012)

Finalmente, otros geógrafos también han prestado atención al problema del ACA en los últimos años. Sus consideraciones no difieren, en lo esencial, de lo planteado hasta el momento. De este modo, se caracteriza el área como la de mayor desarrollo económico

y demográfico de la región, con una característica articulación policéntrica y un flujo de movilidad muy alto entre los distintos centros funcionales (Fernández García et al. 2007; García Oviedo et al. 2013; Méndez García y Ortega Montequín 2013; Ortega Montequín 2017). En la ordenación apuestan por tesis similares a las últimas planteadas, es decir, por la planificación y ordenación de esta área a partir de fórmulas jurídicas y administrativas ya existentes, apelando a la coordinación entre administraciones (Fernández García et al. 2007).

Quizás la aportación más interesante parta del informe sobre los problemas territoriales realizado por Fernández García (2010). Éste, desde la perspectiva del análisis académico, vuelve a constreñir el Área Central a la parte septentrional del centro de la provincia, sin la tradicional inclusión de las Cuencas Mineras que todos los autores anteriores han tendido a valorar.

2.2.2. EL RECONOCIMIENTO INSTITUCIONAL

A diferencia de lo planteado desde la academia, donde se han manejado conceptos teóricos sobre el Área Central, a menudo bastante indefinidos en lo que a su delimitación física se refiere, el reconocimiento administrativo del ACA siempre ha llevado asociado una delimitación precisa. Ésta, sin embargo, ha ido variando con el paso del tiempo.

2.2.2.1. El ACA en los primeros documentos de ordenación y planificación económica

El Plan General de Ordenación Urbana de la Comarca Central de Asturias (Dirección General de Urbanismo 1964) se puede considerar como el primer intento de planificación sobre el conjunto de lo que se ha denominado el Área Central de Asturias. De hecho, este plan propone una zonificación general del ámbito central de Asturias (Fig. 2.6) que, en lo general, guarda estrecha relación con la configuración actual de este ámbito (Carrero de Roa 2011).

En este plan ya se caracteriza al Área Central, considerada como la espina dorsal de Asturias, por su carácter policéntrico y diversidad funcional. Son aspectos que, por contribuir al equilibrio territorial de esa comarca central, se considera deben de ser conservados (Dirección General de Urbanismo 1964).

Una década más tarde, la definición de los polos propuestos por el II Plan de Desarrollo (1968-1971) afectaba a parte del ACA; estrictamente, al conocido como “ocho asturiano” (Fernández García 1984). Frente a la habitual definición del Área Central asturiana a partir de límites administrativos, en el polo de desarrollo de Oviedo se delimitaba la realidad geográfica que definía los centros funcionales, urbanos e industriales de la región, sin hacer caso de los límites administrativos oficiales (Fig. 2.7) (Presidencia del Gobierno 1969).

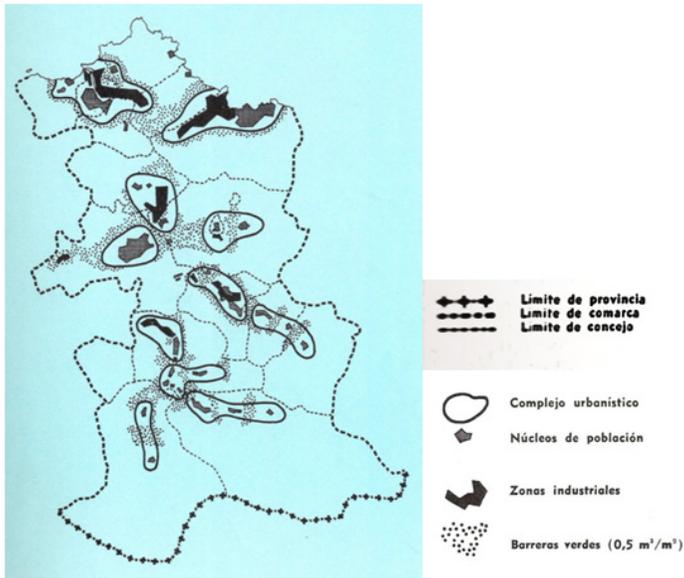


Figura 2.6. Propuesta de ordenación de la Comarca Central de Asturias incluida en el documento elaborado desde el Ministerio de la Vivienda (Dirección General de Urbanismo 1964). Fuente: tomado de Carrero de Roa (2011)

2.2.2.2. El ACA en las Directrices Regionales de Ordenación del Territorio

Es con la publicación de las Directrices Regionales de Ordenación del Territorio de Asturias (Gobierno del Principado de Asturias 1991) cuando se realiza por primera vez una planificación territorial global del conjunto de la región. En ella, el Área Central merece una directriz específica, en la que se expone una delimitación del ámbito.

Si bien se propone una definición del Área Central a partir de la agrupación de 18 concejos (Fig. 2.8), las directrices recogen parte de la indefinición propia de la literatura académica a la hora de delimitar el área objeto de ordenación. En este sentido, el texto de las directrices plantea que la delimitación anterior no debe de interpretarse en un sentido estricto. Al contrario, para la “detección de las grandes líneas de problemática territorial del núcleo más central de Asturias [...] cabe considerar también como zona central a los concejos limítrofes con los citados, ya que en ellos se puede compartir, en grandes líneas, dicha problemática territorial” (Gobierno del Principado de Asturias 1991).

El documento no clasifica el ACA como un área metropolitana y, si bien plantea un breve modelo territorial para el ámbito, deja su desarrollo en manos de unas posibles directrices subregionales de ordenación del territorio para el Área Central.

Como aspecto territorial más destacado, las directrices identifican el triángulo Oviedo-Pola de Siero-Lugo de Llanera como ámbito singular. Se trata de un espacio central objeto de dinámicas de origen supramunicipal, en relación con los flujos demográficos y económicos que se articulan entre los distintos centros funcionales que componen el ACA. En este sentido, se recomienda la realización de un estudio específico para la reordenación urbanística de este enclave territorial, dado su desorden y problemática de origen supramunicipal.



Figura 2.7. Área del polo de desarrollo de Oviedo. Fuente: tomado de Fernández García (1984)

Sucesivos borradores de diferentes tipos de planes han aparecido a lo largo de las últimas décadas con el fin de dar solución a la ordenación de este ámbito, en el claro reconocimiento de su articulación como centro neurálgico de las dinámicas del ACA. Cabe mencionar en este sentido el proyecto anunciado en el año 2007, conocido como “proyecto Teixidor” (Maurín Álvarez 2011), y el Plan Territorial Especial (PTE) de los Nudos Metropolitanos de los concejos de Llanera y Siero del 2009 (García Oviedo et al. 2013).

Con todo, estas directrices son aún hoy en día el único documento normativo vigente en la legislación actual, al no haberse aprobado ninguna de las modificaciones posteriormente propuestas. En este sentido, la delimitación que incluyen es la única de todas las planteadas que cuenta con soporte legal.

2.2.2.3. El reconocimiento del ACA en la planificación sectorial

A nivel sectorial, tanto desde la administración autonómica como desde la estatal, se ha reconocido el ACA como un sistema territorial coherente, objeto de consideración específica. Sin embargo, su delimitación varía en función del documento analizado.

A nivel regional, las Directrices Sectoriales de Equipamiento Comercial (Gobierno del Principado de Asturias 2010) delimitan una zona metropolitana central y un ámbito de influencia de la misma (Fig. 2.9). Por su parte, a nivel estatal, el Plan Estratégico de Infraestructuras y Transporte (PEIT 2005-2020) considera el ACA como aglomeración supraurbana (Rodríguez Gutiérrez et al. 2009). A diferencia del anterior, no incluye ninguna delimitación específica del ámbito. No obstante, asume la relación de áreas urbanas y metropolitanas delimitadas por el Atlas Estadístico de las Áreas Urbanas de España, por lo que se entiende que los límites de éstas se corresponderán con los propuestos por el citado documento.

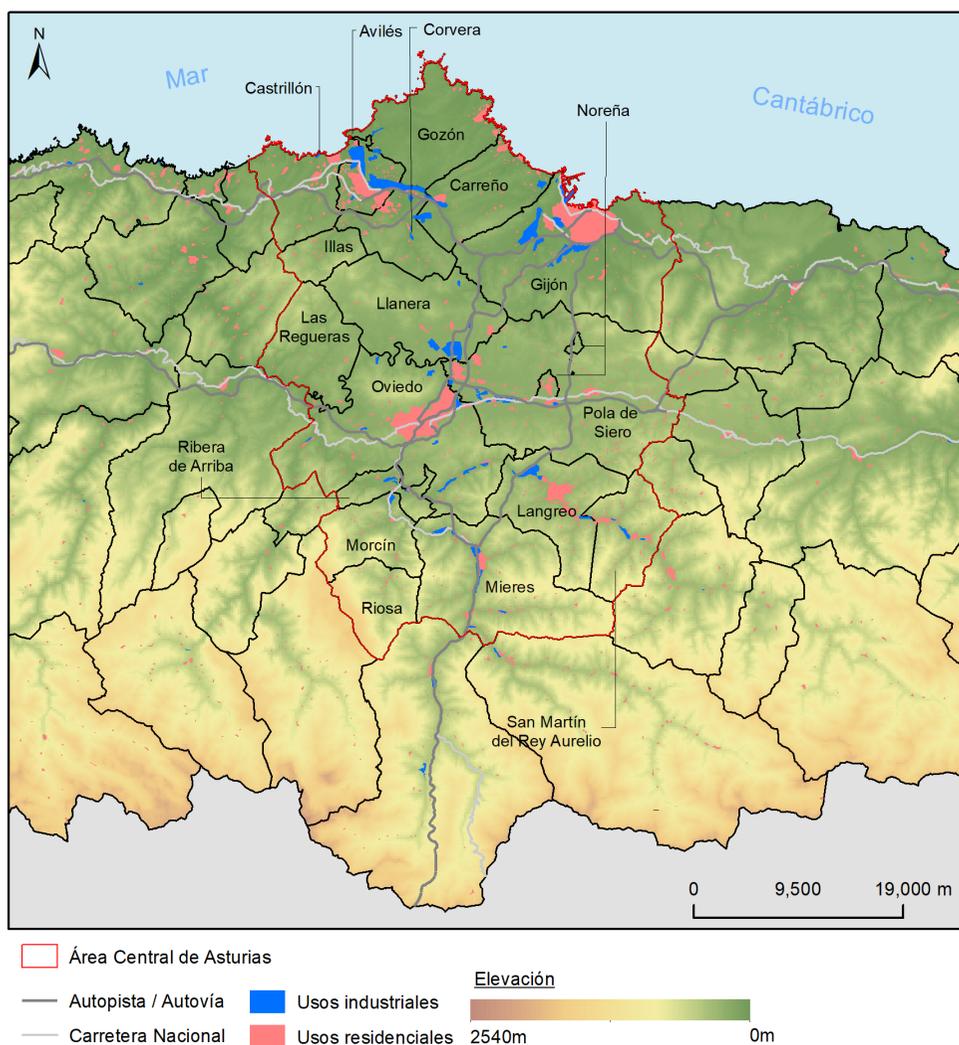


Figura 2.8. Delimitación del Área Central de Asturias, según lo indicado en las Directrices Regionales de Ordenación del Territorio de 1991. Fuentes: Mapa Topográfico Nacional 1:200.000; MDT200m; Líneas límite municipales (IGN)

El Atlas Estadístico de las Áreas Urbanas de España, promovido por el Ministerio de Vivienda, o sus predecesores, ha definido en todas sus ediciones el ACA como una aglomeración urbana, sin que exista una variación de la delimitación propuesta en cada una de las ediciones (Dirección General de la Vivienda 2000; Ministerio de Vivienda 2004, 2006). Tal delimitación, se corresponde con la planteada en las Directrices Regionales de Ordenación del Territorio de Asturias de 1991 (Fig. 2.8).

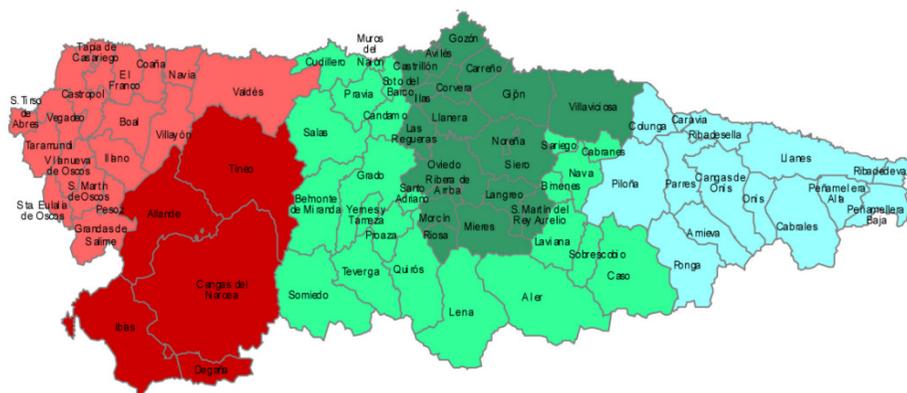


Figura 2.9. Zonificación comercial del Principado de Asturias establecida por las Directrices Sectoriales de Equipamiento Comercial (Gobierno del Principado de Asturias 2010). En verde oscuro se indica la zona metropolitana central, mientras que en verde claro se define el área de influencia de la zona metropolitana central. Fuente: tomado de Gobierno del Principado de Asturias (2010)

2.2.2.4. La fallida actualización/revisión de las directrices regionales y la redefinición del Área Central

Desde su publicación en 1991, se han realizado varios intentos de actualización y desarrollo de las Directrices Regionales de Ordenación del Territorio de Asturias. Tal documento preveía la posibilidad de creación de unas directrices subregionales específicas para el Área Central. Sólo recientemente se ha hecho público un primer borrador de las mismas (Gobierno del Principado de Asturias 2016), si bien existe constancia de la existencia de dos versiones previas en los años 1992 y 1998 (Gobierno del Principado de Asturias 2006a). Éstas, sin embargo, nunca han llegado a ver la luz, por lo que desconocemos la interpretación del Área Central que las mismas contenían.

La propuesta de subdirectrices del ACA publicada en 2016, junto a una propuesta de revisión del conjunto de las directrices regionales (Gobierno del Principado de Asturias 2016), reconoce ya el Área Central como un espacio metropolitano, el cual delimita a partir de una serie de criterios cuantitativos. Basándose en éstos, dibuja un Área Central bastante más extensa que la propuesta por las directrices del 91, la cual se extiende por toda la franja central de la Comunidad Autónoma (Fig. 2.10).

Esta propuesta no dista mucho de la incluida en la revisión de las directrices publicada en 2006, la cual nunca llegó a aprobarse definitivamente (Gobierno del Principado de Asturias 2006a). Este borrador incluía una actualización de las directrices regionales, junto a una serie de directrices específicas para el Área Central, a la que se da un peso significativo en el diagnóstico territorial.

De forma similar a los postulados académicos de Murcia Navarro (1980) y Fernández Prieto y Fernández Cuesta (1991), se interpreta en tal documento el Área Central como parte indisociable del conjunto de la provincia. En consecuencia, la solución a los problemas de esta área específica se propone en clave regional, asociada a la estrategia a

seguir para el conjunto de Asturias. Quizás como consecuencia de tal enfoque, que evita la creación de un instrumento de ordenación específico para el Área Central, que obligaría a una delimitación precisa de la misma, no incluye este borrador una clara definición de los territorios comprendidos como parte del área central o territorio metropolitano. No obstante, siguiendo lo establecido por parte de la cartografía incluida en el documento, el entendimiento del Área Central en este borrador de las directrices de 2006 no difiere mucho del finalmente propuesto en 2016 (Fig. 2.11).

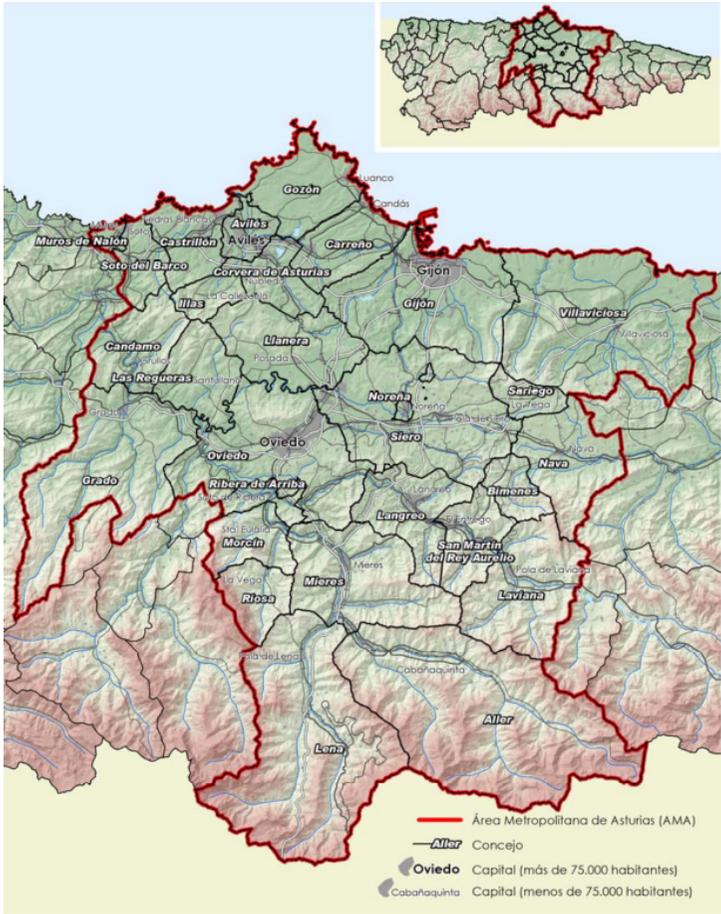


Figura 2.10. Delimitación del ACA propuesta en el avance de las directrices subregionales de ordenación del Área Central de Asturias. Fuente: tomado de Gobierno del Principado de Asturias (2016)

2.2.3. LA DELIMITACIÓN ADOPTADA EN ESTA INVESTIGACIÓN

Una de las principales dificultades asociadas a la definición del Área Central de Asturias deriva de la discontinuidad del fenómeno metropolitano. Este se desarrolla con diferentes intensidades y en distintas formas, llegando a influir a gran parte del territorio regional. Encontramos así espacios urbanos e industriales de notable dinamismo, junto a ámbitos rurales que mantienen un paisaje de índole tradicional, con ciertas transformaciones.



Figura 2.11. Ámbitos zonales generales propuestos en el avance de la Revisión de las Directrices Regionales de Ordenación del Territorio publicadas en 2006. En rojo se indican los tres ámbitos zonales que, de forma grosera, definen el denominado Espacio Central Metropolitano (EMC): el urbano central y denso; el periurbano central y el rural central (y no costero). No obstante, tomando como referencia los límites administrativos, el documento propone una delimitación del Área Central similar a la incluida en la propuesta de directrices subregionales de 2016. Fuente: tomado de Gobierno del Principado de Asturias (2006a)

Además, como ocurre para el caso de la delimitación de cualquier hecho o fenómeno geográfico, la mayor parte de la información disponible, especialmente la de carácter socioeconómico, se encuentra recogida para los diferentes límites administrativos (parroquial, municipal, provincial, nacional...). Cuando es empleada para llevar a cabo una propuesta de delimitación o, incluso, para caracterizar el área de estudio, impone notables restricciones. En este caso, la delimitación debe ceñirse estrictamente a los límites administrativos considerados. Al contrario, si se opta por áreas de estudio cuyos límites no siguen los administrativos, la cantidad de datos susceptibles de ser utilizados en el análisis es mucho más pobre.

Para esta investigación, y dado el notable desacuerdo existente en la delimitación del ACA, hemos optado por seguir la delimitación propuesta por las Directrices Regionales de Ordenación del Territorio de 1991 (Fig. 2.8). Es la única norma de ordenación del territorio del conjunto de Asturias en vigor. Además, esta delimitación se ciñe a los límites municipales, lo que permite la consideración de la mayor parte de variables socioeconómicas en los análisis de esta investigación. Esta delimitación incluye también el territorio más dinámico del ACA y el que, por tanto, resulta más relevante en relación con los cambios de usos y coberturas del suelo.

Si bien el resto del espacio regional resulta de interés en términos funcionales, por su clara vinculación con los principales centros de actividad del centro de Asturias, no se dan en él cambios territoriales de importancia y gran tamaño, lo que complica e, incluso, impide su estudio a través de un ejercicio de modelización del Cambio de los Usos y Coberturas del Suelo (*Land Use Cover Change*, LUCC). En este sentido, no debemos de olvidar que un ejercicio de modelización LUCC, como cualquier análisis geoespacial, no es más que una simplificación de un sistema real. De él, generalmente tan sólo estudiamos

los principales procesos y elementos estructurantes. Para el caso del ACA, estos se localizan en su práctica totalidad en el territorio comprendido en la delimitación del área propuesta por las directrices del 91.

2.3. EL SISTEMA TERRITORIAL DEL ACA

2.3.1. EL ÁREA CENTRAL COMO PARTE INTEGRANTE Y DEFINIDORA DEL CONJUNTO REGIONAL

Consecuencia de las dificultades para su limitación, así como de su clara vinculación con el resto de la provincia, no puede realizarse una completa caracterización del sistema territorial del ACA sin entender su papel en el conjunto regional. En este sentido, cuando se menciona el ACA, suele hacerse enfatizando su papel determinante en la explicación del sistema territorial asturiano (Fig. 2.12) (Maurín Álvarez 1992a; Gobierno del Principado de Asturias 2006a; Fernández García et al. 2007). Rodríguez Gutiérrez et al. (2009) definen el Área Central y su personalidad como una realidad geográfica dependiente del conjunto regional en el que se integra.

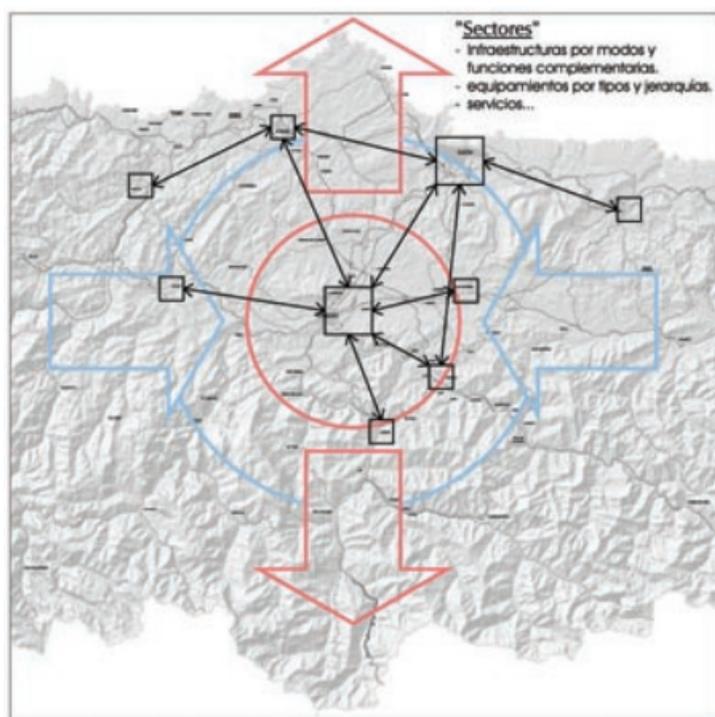


Figura 2.12. Esquema gráfico del sistema territorial de Asturias, en relación con su Área Central, incluido en la propuesta de revisión de las Directrices Regionales de Ordenación del Territorio de 2006. Las flechas en color azul muestran la clara dependencia del conjunto regional (las alas oriental y occidental) respecto al centro de la región. Fuente: tomado de Gobierno del Principado de Asturias (2006a)

La industrialización del centro de Asturias es paralela al retroceso del modo de vida tradicional y su consiguiente economía agropecuaria. La actividad industrial, necesitada de mejores comunicaciones y economías de escala, se concentra en el centro de la región a

la par que, las alas, de carácter netamente rural y, por tanto, en clara situación de retroceso económico, pierden población y dinamismo. Se crea desde entonces la dialéctica centro-alas, que aún permite explicar el sistema territorial asturiano hoy en día.

2.3.2. LAS CARACTERÍSTICAS DEFINIDORAS DE SU SISTEMA TERRITORIAL

La mayor parte de los autores y documentos tienden a coincidir en la definición del ACA como un sistema policéntrico y funcionalmente complementario, en el que cada una de las partes ejerce una función distinta, pero complementaria, en el conjunto regional (Murcia Navarro 1980; Quirós Linares 1982; Fernández García et al. 2007; Rodríguez Gutiérrez et al. 2009; Fernández Soto 2013). Se trata de una definición que, pese a la evolución que ha sufrido el área desde el siglo pasado hasta la actualidad, aún se mantiene vigente. De hecho, el diagnóstico de la propuesta de directrices subregionales para el Área Central recientemente publicado mantiene tal idea (Gobierno del Principado de Asturias 2016).

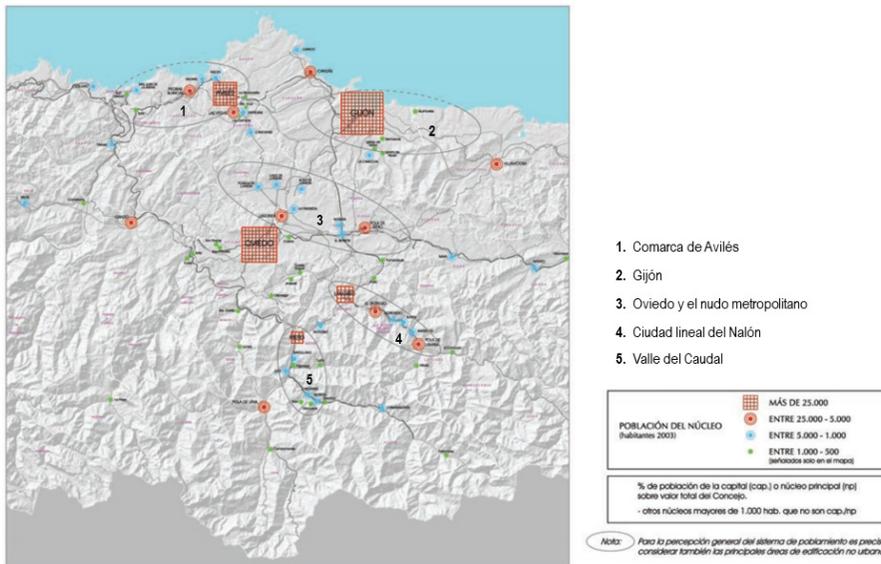


Figura 2.13. Representación gráfica de los cinco grandes ámbitos urbanos del ACA. Éstos quedan definidos a partir de las formas circulares o elípticas grises. Fuente: tomado de Gobierno del Principado de Asturias (2006a)

Del mismo modo, la definición del ACA siempre ha ido asociada a la identificación de sus cinco grandes ámbitos urbanos y, en cierta medida, funcionales. Éstos, de acuerdo con la clasificación propuesta por Rodríguez Gutiérrez et al. (2009), se corresponden con la aglomeración urbana de Avilés, Gijón y su franja periurbana, Oviedo y el centro metropolitano (Llanera, Siero y Noreña), Mieres y el valle del Caudal y la Ciudad Lineal del Nalón (Fig. 2.13).

En contacto con éstos se encuentra un sistema urbano de villas, pequeños núcleos urbanos con una masa crítica de población y servicios, que actúan a modo de enlace entre estos grandes espacios urbanos y su entorno rural circundante (Rodríguez Gutiérrez et al. 2013). Algunas se han integrado como parte de los cinco nodos urbanos anteriormente apuntados y quedan paulatinamente definidas por las dinámicas propias del Área Central (Fig. 2.14). Es en las villas anexas al Área Central donde ese papel de llave entre el mundo urbano y rural sigue más patente.

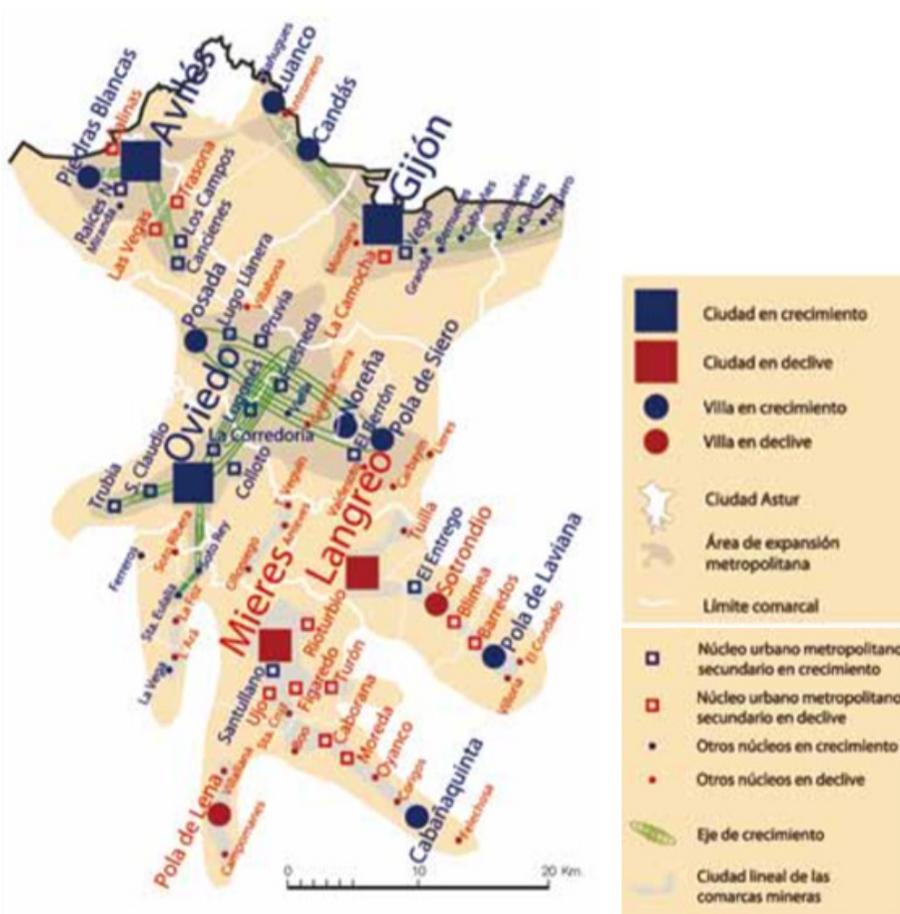


Figura 2.14. Sistema territorial del Área Central de Asturias, que muestra el papel de las villas en el mismo. Se incluye también información relevante sobre el dinamismo sociodemográfico de las distintas partes del Área Central. Fuente: tomado de Rodríguez Gutiérrez et al. (2013)

Entre todos esos espacios urbanos, se desarrolla todo un territorio escasamente urbanizado, de vocación forestal, ganadera y, en menor medida, agraria, fruto de la complicada orografía del territorio asturiano, así como de su claro carácter rural. Es lo que en varios documentos se ha concebido como el sistema de espacios libres del ACA (Gobierno del Principado de Asturias 2006a, 2016; Fernández García et al. 2007) y que Rodríguez

Gutiérrez y Menéndez Fernández (1999) conciben como una suerte de parques metropolitanos.

En el dinamismo y evolución de todo este territorio central ha jugado un papel clave la accesibilidad proporcionada por las distintas infraestructuras de comunicación (Fig. 2.15) (Gobierno del Principado de Asturias 2016). No en vano, el gran desarrollo del nudo metropolitano se basa en su posición central y gran accesibilidad (Gobierno del Principado de Asturias 1991; Herrán Alonso 2002). En este sentido, se suele considerar la autopista “Y” (Fig. 2.16) como uno de los elementos estructurales centrales del ACA y que explica gran parte de su evolución reciente (Fernández García et al. 2007; Fernández García 2013; Ortega Montequín 2017).



Figura 2.15. Estado de la red de carreteras de Asturias en 2010. A) Accesos a Parque Principado (pendiente); B) Enlace de Siero de la Autovía Minera; C) Enlace en El Montico hacia El Musel y ZALIA (completado enlace, pero no conexión con el Musel y la ZALIA); D) Ronda Norte de Avilés (pendiente); E) Tercer carril de la Autopista "Y" (pendiente); F) Enlace Cardeo (pendiente); G) Enlace de Ujo (pendiente); H) Enlace Hospital Central de Asturias; J) Autovía Langreo-Avilés (en construcción); K) Autovía del Cantábrico; M) Autovía Lieres-Arriendas (sin proyecto); O) Inconclusión del corredor del Nalón (desdoblamiento Langreo-Laviana); P) Inconclusión del corredor del Nalón (desdoblamiento Langreo-Laviana); Q) “Y” de Bimenes; R) Carretera Valnalón-Bendición (en proyecto); T) Ronda Norte de Oviedo (sin proyecto). Fuente: tomado de Fernández García (2010)



Figura 2.16. Representación gráfica de la autopista “Y”, que une las ciudades de Avilés, Gijón y Oviedo. Fuentes: Mapa Topográfico Nacional 1:200.000; PNOA Máxima Actualidad (IGN)

Del mismo modo, el puerto del Musel se ha planteado como uno de los principales ejes del desarrollo de la región (Fernández García et al. 2007). De hecho, parte de la condición de Avilés y Gijón como espacios de localización de la gran industria pesada en la segunda mitad del siglo XX viene determinada por su posición costera y, por ende, por su accesibilidad portuaria (Maurín Álvarez 1992a).

2.3.3. LA EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL SISTEMA TERRITORIAL

2.3.3.1. Los antecedentes

No es hasta los siglos XIX y XX que el sistema territorial asturiano presenta un claro desequilibrio, a partir de la concentración de funciones y actividades en su área central. Hasta entonces, el territorio asturiano había permanecido en armonía, con un sistema territorial asentado en un conjunto de villas de fundación medieval, que actuaban a modo de pequeños centros de servicios de un entorno rural, conocido como alfoz, sobre el que ejercían su influencia (Fig. 2.17) (Ruiz de la Peña 1981).

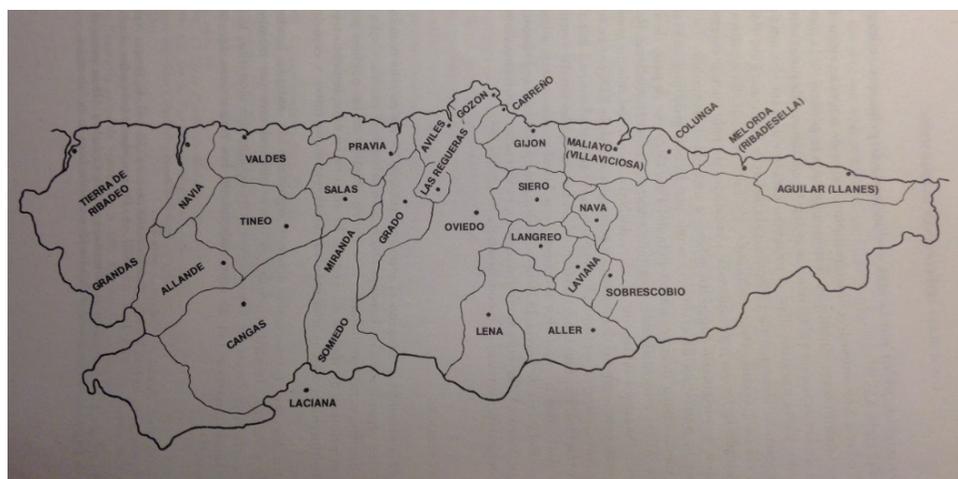


Figura 2.17. Administración territorial de Asturias durante la Edad Media. Los puntos indican las villas y centros urbanos, mientras que los límites territoriales demarcan la extensión de los alfoz de tales centros. Es decir, el entorno rural sobre el que ejercían su influencia. Como se puede comprobar, Oviedo dominaba el centro de la región y conformaba, junto a Avilés, una única unidad funcional. Eran por entonces los centros urbanos superiores de la jerarquía urbana asturiana. Fuente: tomado de Ruiz de la Peña (1981)

En ese sistema territorial tan sólo podemos mencionar dos ciudades o núcleos urbanos de mayor entidad: Oviedo y Avilés. La primera, ubicada en el centro geográfico de Asturias, adquiere tal carácter en herencia de su anterior papel altomedieval como sede episcopal y regia, que posteriormente evoluciona hacia el rol de capital eclesiástica y de centro administrativo, hospederil, comercial y artesanal (Maurín Álvarez 1992a). Reforzamiento de tal posición, Oviedo se convierte en sede de la universidad desde el siglo XVII (Suárez

y Quirós Linares 1977). Por su parte, Avilés actuaba como puerto comercial de Oviedo y, en general, de Asturias (Fernández Soto 2013). A ello se le sumaba el desarrollo de una actividad comercial y pesquera estimables en torno al inicial barrio de Sabugo (Maurín Álvarez 1992a).

La localización de ambas ciudades en el ACA da el primer testimonio del papel destacado y simbólico de este ámbito en el conjunto regional. Sin embargo, la capacidad de transformación territorial de los centros urbanos e industriales era aún escasa en las edades Media y Moderna, y de ahí el general equilibrio del sistema territorial de Asturias por entonces.

2.3.3.2. La polarización territorial con la primera industrialización: la aparición del “ocho asturiano”

Es a partir del siglo XIX pero, sobre todo, del XX, cuando se produce la primera polarización del sistema territorial asturiano, consecuencia de la incipiente industrialización de Asturias, fundamentalmente a manos de la actividad minera. La actividad de extracción de la hulla, a la que se vincula la industria siderúrgica, convierte los valles del Nalón y del Caudal y, por ende, los entornos de Mieres y Langreo, en nuevos centros funcionales y demográficos del ACA (Maurín Álvarez 1992a). La actividad vinculada a esos centros funcionales, objeto de la primera industrialización, explica también parte de la configuración del resto del actual ACA (Fig. 2.18).



Figura 2.18. Localización de la Cuenca Hullera Asturiana y relación de principales infraestructuras de comunicación vinculadas a la extracción del carbón. Fuente: tomado de Maurín Álvarez (2010)

Gijón se convierte en el puerto de salida de las exportaciones del carbón a través de la denominada “carretera carbonera”, así como con la implantación de la primera línea de ferrocarril de Asturias: el ferrocarril de Langreo, entre la ciudad de tal nombre y Gijón (Fig. 2.18) (Cortizo Álvarez et al. 1990). Una vez saturado éste, la otra salida de la Cuenca Minera se establece a través del valle del Nalón y el puerto de San Esteban (Fig. 2.18), señalado por algunos como el actual límite geográfico del ACA (Fernández Soto 2013).

Junto a la actividad de extracción del carbón y la industria siderúrgica en las cuencas del centro meridional de la región, se establecen también durante estos siglos otras de las industrias que dibujan definitivamente la polarización de la actividad hacia el Área Central. Inicialmente se trataría de las fábricas de armas de Trubia y Oviedo, la fábrica de tabacos en Gijón, y otras pequeñas fábricas de vidrio y textil (Cortizo Álvarez et al. 1990). Más tarde, de industrias de más peso, de carácter minero y siderúrgico en Arnao y Gijón y de tipo químico, cerámico y de metales en el entorno Lugones-Llanera, en el centro geográfico del triángulo formado por las ciudades de Oviedo, Gijón y Avilés (Cortizo Álvarez et al. 1990; Herrán Alonso 2002).

De este modo, el centro de Asturias, consecuencia fundamentalmente de la actividad promovida por la extracción del carbón en las Cuencas Mineras, acaba por constituirse como una auténtica economía de escala o aglomeración, que favorece la instalación de un creciente número de industrias y actividades (Benito del Pozo y Morales Matos 1992). A su vez, esta actividad económica e industrial promueve el desarrollo de las comunicaciones en el centro de Asturias, tanto en carretera como en ferrocarril, frente a las alas. Como consecuencia, estas quedan ya completamente marginadas en el conjunto del desarrollo regional (Maurín Álvarez 1992a).

Con todo, hablamos ya para este periodo histórico de la conformación del denominado “ocho asturiano”, conformado por los núcleos de Avilés, Gijón, Oviedo, Mieres y Langreo (Fig. 2.19) (Maurín Álvarez 1992a).

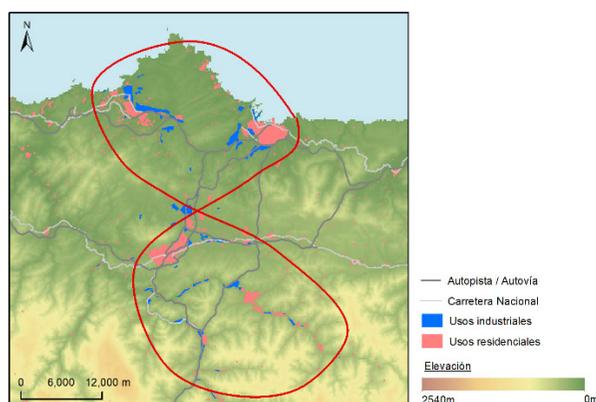


Figura 2.19. Representación gráfica del “ocho asturiano”, conformado por los centros de Avilés, Gijón, Oviedo, la Cuenca del Caudal y la Ciudad Lineal del Nalón. Fuentes: Mapa Topográfico Nacional 1:200.000; MDT200m (IGN)

2.3.3.3. Del ocho al triángulo asturiano

El auge de la actividad minera y siderúrgica en las cuencas hulleras del centro de Asturias, así como en toda la región, estuvo fundamentalmente vinculado a la demanda exterior durante la I Guerra Mundial, y a la demanda interior en el periodo de la autarquía franquista (Benito del Pozo y Morales Matos 1992). Con el I Plan de Estabilización y la incipiente apertura de la economía española al exterior, la demanda de hulla cayó. El sector siderúrgico de las Cuencas Mineras, descapitalizado por el proteccionismo autárquico, de reducidas dimensiones y sin buena comunicación, al carecer de puerto natural de salida

de la producción, se desmoronó (Fernández García 1992a). Se inició entonces un proceso de declive industrial en las Cuencas Mineras asturianas, que aún perdura hoy en día.

En paralelo al fenómeno anterior, como parte de la estrategia desarrollada aún por una economía franquista proteccionista, se instala ENSIDESA en Avilés en 1957 (Fig. 2.20). Se trata de una gran empresa siderúrgica de carácter público, que explica la urbanización de la comarca de Avilés, así como su repentino desarrollo demográfico y económico (Fernández Soto 2013). Tal movimiento estatal no hace más que enfatizar parte de la crisis anteriormente señalada, y que se salda con la agrupación de las tres grandes siderurgias privadas de Asturias (Sociedad Metalúrgica Duro-Felguera, Fábrica de Mieres y Fábrica de Moreda-Gijón, respectivamente localizadas en Langreo, Mieres y Gijón) en una nueva empresa, localizada en Gijón (Fernández Soto 2013).

Con todo, estos movimientos trasladaron al sector septentrional del ACA la industria siderúrgica, es decir, la gran industria transformadora de la región. El carbón regional dejó paulatinamente de ser una fuente energética esencial para esas industrias, que con la apertura económica empezaron a hacer más uso de hidrocarburos y carbones de importación (Maurín Álvarez 2011). En consecuencia, la industria pesada trasladó su posición a la línea de costa, en la búsqueda de comunicaciones que permitiesen una fácil importación de energía, así como la exportación de las materias primas producidas.



Figura 2.20. Cabecera del complejo industrial de ENSIDESA en la década de los años 80. En la imagen se aprecian algunas partes de la fábrica, como el parque de carbones, las baterías de coque, los gasómetros, los altos hornos y la central térmica. Fuente: tomado de Fernández Soto (2013) y Leal Bóveda (2007)

La declaración del Polo de Desarrollo de Oviedo (Fig. 2.7), que afectaba a toda el área septentrional del centro de Asturias, incidió en ese desequilibrio norte-sur a favor del triángulo formado por Oviedo, Gijón y Avilés (Fernández García 1984). También la política de polígonos industriales promovida desde la administración estatal, de los que el de Silvota es quizás el resultado más visible (Maurín Álvarez 1992a; Herrán Alonso 2002).

Con todo, se pasa en este momento del denominado “ocho” al triángulo asturiano (Fig. 2.21), con lo que los desequilibrios del sistema territorial asturiano acaban haciéndose también patentes en su espacio central.

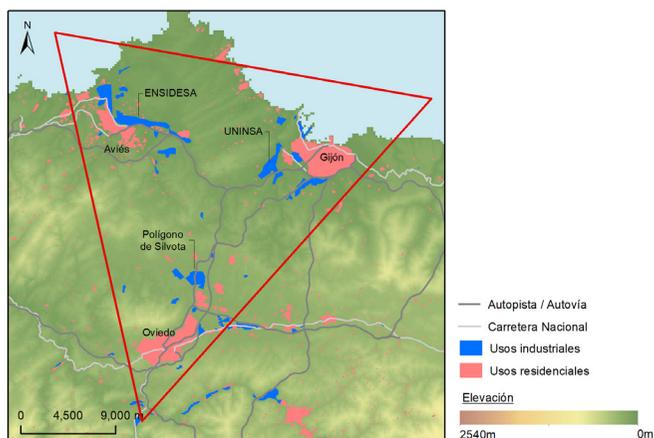


Figura 2.21. Representación gráfica del “triángulo asturiano”, conformado por los centros de Avilés, Gijón y Oviedo. El área más cercana a Oviedo se beneficia a partir de este momento de la alta accesibilidad y desarrollo económico de los tres principales centros urbanos de la región. Fuentes: Mapa Topográfico Nacional 1:200.000; MDT200m (IGN)

2.3.3.4. La reconversión industrial. Del triángulo al trapecio y la dualidad Oviedo-Gijón

La definitiva liberalización de la economía española y el consiguiente declive de la industria nacional ha terminado por dar forma a la actual estructuración del sistema territorial del ACA. El inicio de la reconversión industrial en los años 80 supuso, en este sentido, la consolidación de la paulatina sangría económica y demográfica de las Cuencas Mineras. También el retroceso de la industria pesada en la parte septentrional del Área Central. Ésta, si bien aún mantiene un papel relevante, ha sufrido importantes transformaciones. Fernández Soto (2013) y Sendín García (1990) hacen un buen relato de la incidencia de tales transformaciones para el caso de las industrias de Avilés y Gijón, respectivamente.

El papel antaño desempeñado por la gran industria pesada en el desarrollo económico de Asturias, ha empezado a estar cada vez más asumido por las pequeñas y medianas empresas (Benito del Pozo 2006). Para hacernos una idea de tal evolución, basta mirar las cifras de trabajadores empleados por las grandes empresas asturianas. ENSIDESA empleaba a más de 26000 trabajadores en 1975 (Fernández Soto 2013). En 1992 ya empleaba a menos de 15000 personas, en 1995 a menos de 10000 y Arcelor, la sucesora privada de ENSIDESA, apenas empleaba a 4500 personas en 2005 (Rodríguez Gutiérrez et al. 2009). La actividad minera, por su parte, pasó de generar más de 25000 empleos en 1990 a apenas 4500 en el 2005 (Rodríguez Gutiérrez et al. 2009).

En las últimas décadas, el desarrollo industrial ha venido aparejado a la aparición de polígonos industriales, siempre desarrollados bajo la iniciativa pública, y que han incidido en la polarización norte-sur del Área Central. De este modo, se ha creado más suelo industrial en el centro septentrional de la región que en las Cuencas Mineras, lo que ha favorecido aún más el desarrollo del primer ámbito (Benito del Pozo 2006).

A la par que se ha ido consolidando el triángulo Oviedo-Gijón-Avilés, la depresión de Oviedo, en el centro neurálgico de región central de Asturias, ha ido adquiriendo un

papel cada vez más relevante. En él se han ido ubicando un creciente número de funciones industriales, residenciales y, en general, de actividades de carácter supramunicipal. La disponibilidad de suelos llanos, muy accesibles y en una posición central respecto al conjunto del ACA, ha favorecido el enorme desarrollo de este ámbito. Éste se encuentra, por tanto, muy vinculado a los enlaces de alta capacidad de tráfico proporcionados por las diferentes autovías y autopistas. El enlace en Lugones de la “Y” fue el primer y decisivo punto de accesibilidad que ha favorecido el desarrollo de toda el área.

Este nuevo centro de actividad, quizás el más pujante de todos los existentes actualmente en Asturias, ha polarizado hacia Oviedo y su entorno el desarrollo demográfico y económico del ACA. De hecho, Oviedo y Noreña, parte del conjunto referido como la depresión de Oviedo, han sido los dos concejos con un crecimiento demográfico más destacado en los inicios del siglo XXI (Fernández García et al. 2007). No obstante, Gijón ha conservado también gran parte de su dinamismo, superando en parte la reconversión industrial de la siderurgia y la industria naval. Su área periurbana ha sufrido así una notable expansión que, incluso, ha terminado por influir en las dinámicas del concejo vecino de Villaviciosa, una vez éste ha incrementado notablemente su accesibilidad con la construcción de la autovía del Cantábrico.

Por tanto, el sistema territorial del Área Central ha ido evolucionando aún más, desde el triángulo anterior a una especie de trapecio (Fig. 2.22). En éste, las dinámicas son distintas. Frente a una parte occidental, representada por la comarca de Avilés, que pierde fuelle y continúa dependiendo en buena medida de la industria pesada, se confirman Gijón y Oviedo como centros primaciales de la jerarquía urbana. Éstos expanden su influencia por su entorno más próximo. Oviedo lo hace con relación al nudo metropolitano, que adquiere la condición de “capital” regional, en el sentido de espacio más accesible y de mayor atractivo para la localización de la mayor parte de las actividades de origen supramunicipal. Gijón, por su parte, ejerce su influencia sobre toda la línea de costa y, en este sentido, contribuye al estiramiento del trapecio hacia el este, de la mano de la autovía del Cantábrico.

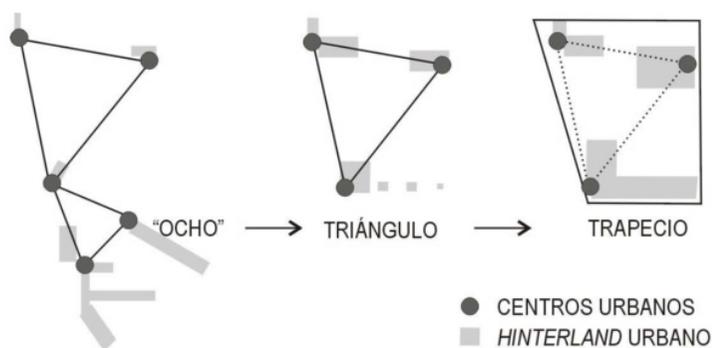


Figura 2.22. Esquema gráfico de la evolución del sistema territorial asturiano. Fuente: tomado de Méndez García y Ortega Montequín (2013)

2.3.4. CARACTERIZACIÓN DE LOS GRANDES CENTROS URBANOS Y FUNCIONALES

2.3.4.1. La Comarca de Avilés

Pese a su importancia medieval, el papel de Avilés y su comarca en el conjunto del ACA durante el periodo de la primera industrialización fue limitado. Es a partir de mediados de siglo XX, con la instalación de ENSIDESA, cuando se produce la gran transformación territorial de esta ciudad y toda su comarca, consecuencia del elevado número de trabajadores que la empresa estatal empleó (Fernández Soto 2013). Con ENSIDESA llegaron otras grandes industrias, que favorecieron el desarrollo económico e industrial de todo el ámbito, como Cristalería Española (1952), la Empresa Nacional de Aluminio (1958) o Asturiana de Zinc (1959) (Benito del Pozo y Morales Matos 1992). Esta economía de claro carácter industrial definió la comarca durante décadas, y de ahí también los grandes efectos que la reconversión industrial tuvo sobre la misma en comparación con los dos otros grandes centros de la región: Gijón y Oviedo.

De esta manera, la aglomeración urbana de Avilés queda fundamentalmente definida por la concentración industrial que se desarrolló en los años 50-60 y que rebasó, con mucho, los límites del concejo de Avilés. Se integra así esta comarca, de acuerdo con la delimitación propuesta por Fernández Soto (2013), por los concejos de Avilés, Corvera, Castrillón e Illas, así como por el borde del concejo de Gozón en contacto con la ría de Avilés, espacio articulador de la citada industrialización.

Ese auge industrial de los 50 supuso un crecimiento económico y demográfico de la comarca repentino y desorbitado. Entre 1950 y 1975, el concejo de Avilés pasó de 21270 a 85111 habitantes (Morales Matos y Méndez García 1992), que han de sumarse al crecimiento de los otros concejos que participaron de este proceso industrializador. Para alojar a toda esta enorme masa de población, fue necesario construir un buen número de poblados obreros (La Carriona, Llaranes (Fig. 2.23), La Luz, La Magdalena, Versailles, Villalegre...), que aún en día definen la comarca de Avilés y explican parte de sus dinámicas. Ambos usos, industriales y residenciales, dieron lugar a la integración de gran parte de los concejos mencionados en un continuo urbano que se extiende por todos los municipios, salvo Illas, ubicado al interior y de clara orientación rural.

Paralelo a la reconversión industrial y el declive de todas las industrias anteriormente mencionadas, el desarrollo de la comarca de Avilés ha venido presentado una doble tendencia. Aquellas zonas más cercanas a las grandes industrias, así como todas esas barriadas obreras surgidas al calor del inusitado crecimiento demográfico, presentan una evolución claramente negativa (Rodríguez Gutiérrez et al. 2009; Prada Trigo 2011a), en relación con sus peores condiciones ambientales y problemas estructurales.

Al contrario, los núcleos de mejores condiciones ambientales y las nuevas áreas residenciales protagonizan el dinamismo de la comarca de Avilés (Rodríguez Gutiérrez et al. 2009; Prada Trigo 2011a). Éste se realiza así en la periferia de la misma, alejado de los principales barrios de la ciudad y, en general, en la franja costera. De este modo, Castrillón

ha sido el único concejo de toda la comarca con una dinámica demográfica y económica positiva en las últimas décadas (Rodríguez Gutiérrez et al. 2009), fundamentalmente protagonizada por su núcleo capital, Piedras Blancas, suficientemente alejado del entorno industrial-residencial originado al calor de la industrialización del siglo XX. Los otros grandes sectores de desarrollo residencial se han concentrado fundamentalmente en el entorno del embalse de Trasona (urbanización de los Balagares y barrio de Las Vegas) (Fig. 2.24), de mayor calidad ambiental y paisajística, sin contacto directo con el entorno industrial de la ría.



Figura 2.23. Barrio de Llaranes, en Avilés. Localizado junto a las antiguas instalaciones de ENSIDESA, es uno de los ejemplos más representativos de barriada obrera fruto del paternalismo industrial del siglo XX. A la uniformidad y planta geométrica, se une la presencia de servicios y espacios asimilables a los de cualquier ciudad, como una plaza mayor o una iglesia, en el centro de la imagen. Fuente: Google Maps

No obstante, la comarca de Avilés sigue manteniendo un claro perfil industrial. La industria representa el 36.5% del PIB del concejo capital y el 24.4% del empleo, que aún son mayores en el caso de Corvera, donde el sector industrial representa el 68,6% del PIB y supone el 47% del empleo (Fernández Soto 2013). De este modo, la comarca de Avilés aún es sede de grandes plantas siderometalúrgicas y químicas, como AZSA, CESA, Arcelor-Mittal, ALCOA o Dupont (Fernández Soto 2013). Esto denota el claro papel de Avilés y su comarca como polo del distrito industrial del ACA. Sin embargo, tal papel cuenta con una importante debilidad. Parte de esas empresas son multinacionales, en las que confía buena parte del empleo y futuro progreso de la comarca (Sánchez-Moral et al. 2015), lo que hace de ésta en una entidad muy poco resiliente ante la posible deslocalización de esa industria.

El surgimiento de nuevas actividades industriales, distintas de la industria pesada tradicional, se ha realizado al calor de nuevos polígonos industriales, entre los que se puede citar el Parque Empresarial del Principado de Asturias (PEPA), que han aprovechado en parte los terrenos industriales en desuso, consecuencia del proceso de reconversión industrial de las grandes empresas estatales de la comarca, fundamentalmente ENSIDESA

(Rodríguez Gutiérrez et al. 2009). Inicialmente, los polígonos que surgieron de tal dinámica no revirtieron en un cambio económico del ámbito, al ser ocupados por actividades vinculadas a la industria pesada (Fernández Soto 2013). Al contrario, los últimos polígonos industriales sí han atraído otro tipo de actividad económica, si bien siempre como fruto de la planificación económica y, por tanto, de subvenciones públicas, dado el escaso atractivo que estos suelos parecían suscitar para la iniciativa privada (Fernández Soto 2013).



Figura 2.24. Urbanización de los Balagares, con el hotel resort spa al fondo. El conjunto queda conformado por una urbanización de lujo, cuyas viviendas se aprecian en la imagen, el mencionado hotel y un campo de golf. En primer plano, terrenos baldíos que conforman parte de la posible área de expansión o desarrollo inicial del proyecto. Al fondo, columnas de humo asociadas a la actividad de la industria avilesina. Fuente: fotografía de autor

Asimismo, la dinámica demográfica de Avilés y su comarca, a excepción del concejo de Castrillón, ha sido casi siempre negativa desde la reconversión industrial. De hecho, uno de los últimos grandes proyectos de urbanización en la capital (el plan Especial “La Magdalena Residencial”) ha sido fruto de la iniciativa pública, a través de SOGEPSA, y a partir de la promoción de vivienda protegida (Fernández Soto 2013).

Si bien los esfuerzos de recuperación ambiental de la ría de Avilés (Fig. 2.25) y de rehabilitación y mejora de la imagen de la ciudad han conseguido cambiar en parte la percepción de la misma, aún no han sido capaces de revertir su tendencia de retroceso demográfico y económico. La ciudad ha conseguido renovarse, a partir de un nuevo modelo centrado en la potenciación del sector servicios, maximizando las ventajas de la ciudad, en el triángulo central del ACA (Prada Trigo 2011a). Numerosos autores han considerado esas políticas de renovación como un éxito que plasma la correcta reconversión de Avilés (Sánchez-Moral et al. 2015; Benito del Pozo 2016). Sin embargo, los efectos que el inicio de cambio de modelo ha tenido sobre la ciudad aún no son patentes, a grandes rasgos, en términos demográficos o económicos, y quedan fundamentalmente circunscritos al núcleo principal de la comarca, Avilés, sin que se noten mejorías similares en el resto de la comarca afectada por el proceso desindustrializador.

En conclusión, la comarca de Avilés se articula como el gran centro industrial del Área Central y como el tercer núcleo urbano y funcional de la misma. Sin embargo, presenta una dinámica regresiva y muy diferente a la mostrada por los dos principales centros de

la región: Oviedo y Gijón. Con este último, Avilés y su entorno presentan una situación de dependencia, en tanto el puerto de Gijón (el Musel) posee de una infraestructura mucho más adecuada para gestionar los tráficos generados por la industria pesada asentada en la comarca (Fernández Soto 2013). Esta dependencia industrial Avilés-Gijón pretende aprovecharse a través de la promoción de una Zona de Actividades Lógicas (ZALIA), en el espacio intermedio entre ambas ciudades (Gobierno del Principado de Asturias 2016).



Figura 2.25. Antes y después de un tramo final de la ría de Avilés, tras llevarse a cabo las tareas de recuperación de la misma. Se retiraron los lodos tóxicos presentes en la ría y se realizó su encauzamiento. Esta obra de mejora ambiental ha sido uno de los grandes impulsos del cambio de la imagen urbana de Avilés. Fuente: tomado de Fernández Soto (2013)

El cambio de modelo de Avilés, con la renovación del entorno de la ría y la apuesta por la terciarización y diversificación del sector económico, abre las puertas hacia un reforzamiento del papel de la comarca en el conjunto del Área Central. Sin embargo, tras los esperanzadores resultados iniciales (Sánchez-Moral et al. 2015), la crisis económica ha lastrado parte de las estrategias de recuperación de la comarca y, por consiguiente, ha afianzado la dinámica regresiva y de dependencia anteriormente mencionada.

2.3.4.2. Gijón y su franja periurbana

El puerto de Gijón, como inicial salida al carbón de las Cuencas Mineras asturianas, y posteriormente, como polo industrial dotado de la mayor accesibilidad portuaria de la región, es el factor clave que explica el crecimiento inicial de la villa de Gijón al albor de la primera industrialización (Alvargonzález Rodríguez 1977; Fernández García 1986). Es por el puerto y la actividad industrial a él asociada que Gijón se desarrolla económica y demográficamente en los siglos XIX y XX, hasta convertirse en uno de los principales centros urbanos y funcionales de la región, y punto definidor básico del ACA.

La actividad industrial y minera no se desarrolla sólo sobre la ciudad de Gijón, sino también sobre algunos núcleos de su franja periurbana, como Rocés, Tremañes, Veriña

o La Camocha (Fernández García 1986). En este último, una explotación minera da lugar a dinámicas propias, ajenas a las Cuencas Mineras del centro de la región (Fig. 2.26).



Figura 2.26. A la izquierda, mina de la Camocha. A la derecha, barriadas surgidas, en la franja periurbana de Gijón, fruto de la actividad originada por la actividad minera vinculada a tal pozo. Fuente: Google Maps

El desarrollo industrial de Gijón se produce fundamentalmente en la parte occidental del concejo, limitando con el de Carreño; lo que se vio aún más favorecido si cabe por la declaración y delimitación del Polo de Desarrollo de Oviedo (Fernández García 1986). Se corresponde con el entorno del puerto del Musel.

En ese ámbito occidental, una de las principales industrias que permite explicar gran parte del despegue económico de la ciudad es la Fábrica de Moreda y Gijón, de carácter siderúrgico, que posteriormente acabaría dando lugar a la fundación de UNINSA (Fig. 2.21). Pronto surge una aglomeración industrial en torno a ésta y el puerto, formada por industria de carácter naval, industria proveedora de fuentes energéticas, como petróleo, e industria de carácter alimentario (Fernández García 1986). Es en el entorno del valle de Aboño donde esa aglomeración industrial deja sus efectos más patentes, con la ubicación de la fábrica de cementos Tudela-Veguín, junto a Cementos del Cantábrico SA, el Parque de Carbones de Aboño SA, el Parque de Minerales y la Central Térmica de Aboño (Fig. 2.27) (Fernández García 1986).

En este contexto, se establece una estrecha relación entre puerto y actividad industrial. Ésta demanda un mayor uso del primero que, por tanto, se va sucesivamente ampliando. Consecuencia de los problemas del puerto de Avilés, asume también el puerto de Gijón parte de las demandas de la industria pesada de Avilés (Fernández Soto 2013), lo que termina por constituirlo como una infraestructura estratégica y motor de desarrollo de Gijón. Carácter que aún conserva hoy en día, una vez completada su última ampliación.

De hecho, se calcula que el puerto de Gijón aporta en torno al 11% del PIB de Asturias y el 7% del empleo de la región (Fernández García 2010).



Figura 2.27. Entorno industrial de la ría de Aboño, en el límite occidental del concejo de Gijón con el de Carreño. En primer plano, central térmica y, al fondo, la fábrica de cementos Tudela-Veguín. Se aprecia también en la parte final de la ría el parque de minerales. Fuente: www.flickr.com

En la etapa final del franquismo y con la llegada de la democracia, las políticas de reconversión industrial afectaron también a la economía de Gijón. Sin embargo, a diferencia de lo que ocurriese para el caso de la comarca de Avilés, este centro ha seguido manteniendo su papel e importancia dentro del sistema territorial del ACA. Lo ha hecho de manera pareja con Oviedo, con cuyo núcleo urbano y funcional forma Gijón el eje principal del ACA (Rodríguez Gutiérrez et al. 2009).

Lo anterior es consecuencia del cambio de modelo económico de la ciudad, promovido en su primer Plan General de Ordenación Urbana, popularmente conocido como el Plan Rañada (Obeso Muñiz y Fernández García 2017). Éste concibió la terciarización de la economía del concejo. Tal cambio ha conseguido mantener el pulso de Gijón en el sistema territorial del ACA, todo ello pese a mantener un conjunto industrial de notable entidad (Rodríguez Gutiérrez et al. 2009). Mientras la industria pesada se ha mantenido asociada al puerto del Musel, en el entorno de Tremañes, Veriña y el valle de Aboño, el resto de la ciudad ha sufrido sucesivos procesos de reforma urbana, que han permitido acabar con las disfuncionalidades de la etapa anterior y los importantes espacios industriales que albergaba en su interior (Fig. 2.28) (Fernández Cuesta 2015).

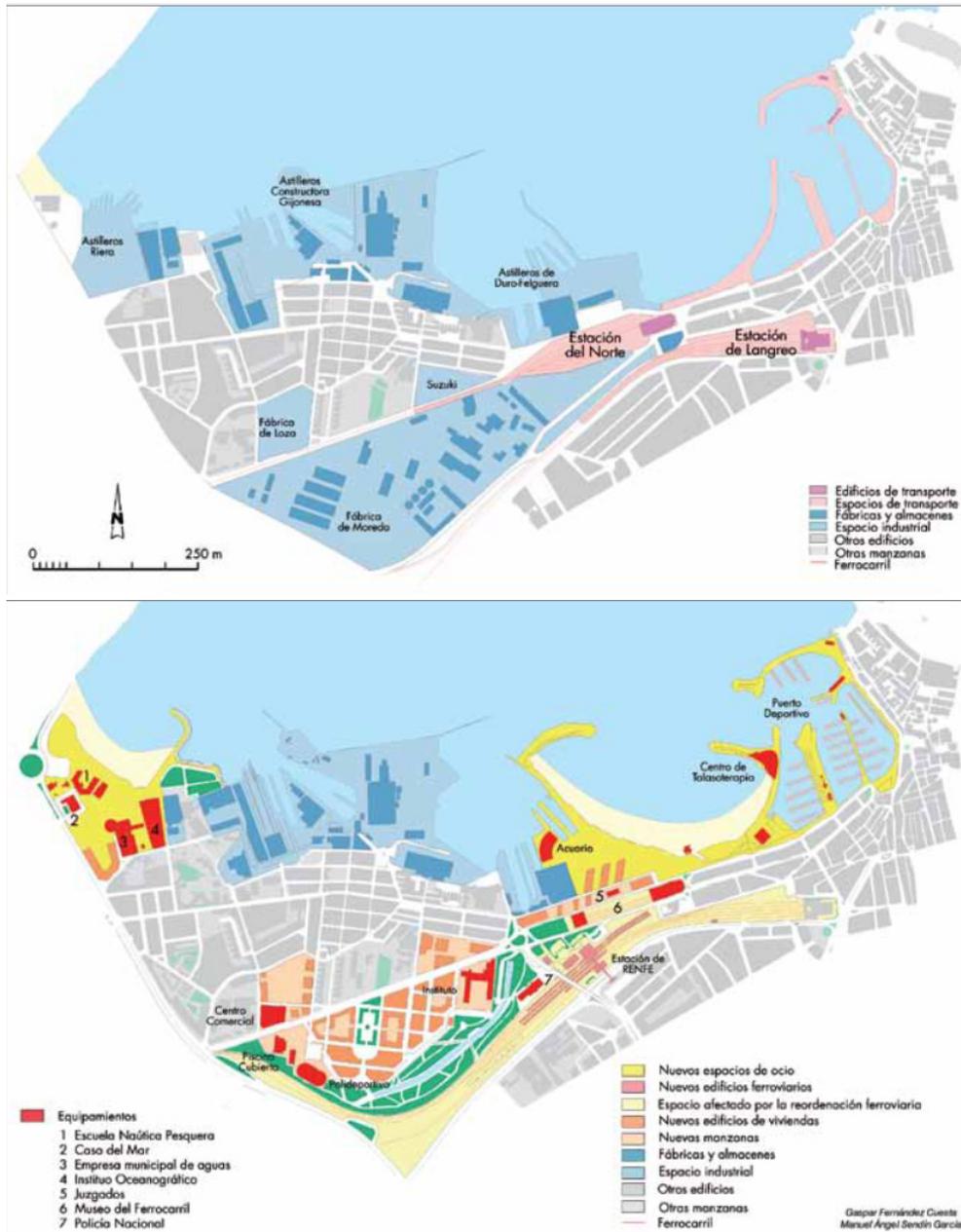


Figura 2.28. Representación cartográfica de la transformación urbana de uno de los espacios más centrales de la ciudad de Gijón, consecuencia del proceso desindustrializador. Fuente: tomado de Fernández Cuesta (2015)

La clara dualidad que históricamente había mantenido la ciudad, entre una parte occidental industrial y una oriental de carácter residencial, con elevada calidad ambiental (Fernández García 1986), plasmada en el desarrollo de una especie de ciudad jardín (Alvargonzález Rodríguez 1977), ha favorecido sin dudas esa terciarización del concejo

de Gijón. De hecho, gran parte del crecimiento residencial reciente de la ciudad se ha hecho a base de vivienda unifamiliar en la parte rural más oriental del concejo (Obeso Muñiz y Fernández García 2017). Consecuencia de tal proceso de difusión residencial, la incidencia del fenómeno metropolitano ha llegado incluso al concejo vecino de Villaviciosa.

En el apartado productivo, el mantenimiento de la industria pesada, recluida en el sector más occidental del concejo, es paralelo al desarrollo de un buen número de polígonos industriales en todo el sector sur y occidental del concejo (Benito del Pozo 2006). También al desarrollo del Parque Científico y Tecnológico en la parte oriental de Gijón, promotor de una economía avanzada y centrada en el I+D (Fernández Cuesta 2015). Ambos tipos de desarrollos han contribuido a la mayor diversificación de la economía de Gijón.

En conjunto, Gijón se alza como uno de los dos centros superiores de la jerarquía del sistema territorial del Área Central, con una dinámica demográfica y económica hasta hace unos años positiva, determinada en parte por el desarrollo residencial en la franja costera, por un lado, y vinculada por otro al papel estratégico que tiene encomendado el puerto del Musel para el conjunto de la industria asturiana.

2.3.4.3. Oviedo y el centro metropolitano

A diferencia de Gijón y Avilés, cuyo papel en el sistema territorial asturiano ha quedado fundamentalmente determinado por los procesos de industrialización, el papel de Oviedo en el conjunto de Asturias ha quedado históricamente favorecido por su condición de capital y, en consecuencia, por su rol de centro administrativo y de servicios.

Prueba de tal papel es el notable crecimiento espacial de Oviedo durante toda la primera mitad del siglo XX a base de vivienda burguesa que relata Tomé Fernández (1988). Podemos entender Oviedo, en este sentido, como la urbe burguesa resultado de la industrialización asturiana, lo que nos da buena prueba del concepto metropolitano que ya por entonces gravitaba sobre todo el ACA. De este modo, las clases directoras de ese proceso industrializador se ubican en la capital de la región, donde paradójicamente no se localiza ninguna de las principales actividades industriales.

El desarrollo de esta urbe burguesa se produce paralelo a la pérdida de importancia de la actividad industrial anterior y a la creciente implantación de usos de carácter institucional (Calleja Puerta et al. 2015). Entre ellos, la Universidad de Oviedo, mayoritariamente localizada en la ciudad, juega un papel clave que, sin dudas, explica parte de la importancia del sector terciario en la ciudad (Suárez y Quirós Linares 1977).

Al descansar sobre el sector servicios, con un sector público muy fuerte, Oviedo, a diferencia de todos los otros grandes centros urbanos de la región, no se vio afectada por los efectos de la reconversión industrial. Al contrario, podemos señalar a ésta como una de las principales causas de su crecimiento residencial y demográfico reciente. De este modo, la ciudad ha recogido parte de la población huida de los centros mineros (Moro

Vallina 2007; Calleja Puerta et al. 2015), en declive económico y demográfico desde los años 60 del siglo XX.

En la reafirmación de su posición como ciudad residencial de gran calidad de vida, Oviedo creó desde finales de siglo XX una política urbana basada en el embellecimiento del espacio público (Fig. 2.28), la rehabilitación de la arquitectura histórica y la construcción de espacios verdes, que relata de una manera profusa Moro Vallina (2007). Esta política ha aumentado el atractivo de la ciudad, que de hecho ha confiado en el crecimiento residencial su motor de desarrollo.



Figura 2.28. En la imagen, catedral de Oviedo vista desde la plaza del Porlier. Se aprecian algunos de los elementos definidores del denominado “modelo Oviedo” de embellecimiento de la ciudad: la peatonalización, monumentalización o las típicas farolas isabelinas. Fuente: www.flickr.com

El PGOU de 1986 encomendó el desarrollo demográfico y residencial de la ciudad en la vivienda unifamiliar en todo el entorno periurbano de Oviedo, ante la falta de oferta para este tipo de vivienda en el resto del Área Central (Moro Vallina 2007). Por su parte, el PGOU de 2006 pone el foco de atención en la generación de nuevos barrios residenciales, como los edificados en la Corredoria (Fig. 2.29), construidos a menudo a base de vivienda protegida (Moro Vallina 2007). De este modo, a una política inicial de rehabilitación y consolidación del espacio urbano central, le siguió un crecimiento residencial en la periferia, ya sea a base de grandes promociones de bloques de vivienda promovidos por las instituciones públicas bajo algún tipo de figura de protección, o bien a base de vivienda unifamiliar en el contacto de la ciudad de Oviedo con su entorno rural circundante (Calleja Puerta et al. 2015).

El atractivo urbano de Oviedo ha resultado en el progresivo desarrollo residencial de su entorno circundante y, más concretamente, de todo el conjunto urbano que conforma la depresión de Oviedo, constituido por los concejos de Llanera, Noreña y Siero. Este espacio queda favorecido por su alta accesibilidad, en el centro geográfico del ACA, así como por la disponibilidad de suelo, habitualmente más barato que el de la capital del Principado (Rodríguez Gutiérrez et al. 2009). Es así en los núcleos situados en el entorno de las carreteras de alta velocidad, como Pola de Siero, Noreña, El Berrón, Lugones o Posada de Llanera, donde se ha producido el mayor crecimiento demográfico de los últimos años (Fernández García et al. 2007). Este proceso ha dado incluso lugar a la apari-

ción de nuevas urbanizaciones residenciales de baja densidad, a base de vivienda unifamiliar, completamente desconectadas de ninguna trama urbana previa. Se trata de las urbanizaciones de La Fresneda (Herrán Alonso 2002) y Soto de Llanera (Fig. 2.30) (Fernández García et al. 2007).



Figura 2.29. Imagen de la Corredoria, uno de los últimos desarrollos residenciales en Oviedo. Se trata de un barrio compuesto por tipologías de edificación abierta en altura y con una importante presencia de vivienda con algún tipo de protección. Fuente: www.sogepsa.com



Figura 2.30. Vista general de la urbanización Soto de Llanera, ubicada en el denominado nudo metropolitano. Fuente: <https://comprarpisoenasturias.com>

Esa especialización residencial y en el sector servicios de Oviedo mantiene su otro pilar en la expulsión de los usos industriales a su entorno circundante. Inicialmente, éstas se ubicaron en diferentes puntos del concejo, como La Manjoya, San Claudio, Olloniego, Trubia o Tudela Veguín (Tomé Fernández 1992), junto a otras en concejos limítrofes, como el entorno de Lugones (Herrán Alonso 2002). Más tarde, ha sido la anteriormente aludida depresión de Oviedo el centro que ha agrupado la práctica totalidad de los nuevos usos industriales, aunque en este caso en la forma de polígonos industriales o parques empresariales (Benito del Pozo y Morales Matos 1992).

A los usos industriales y residenciales anteriormente apuntados, se han añadido, en el conjunto de la depresión, una serie de instalaciones de carácter supramunicipal, que han aprovechado la alta accesibilidad y bondad topográfica del ámbito. De este modo, se ubican aquí centros comerciales de índole metropolitana, colegios privados, instalaciones de carácter deportivo, etc (Fernández García et al. 2007). Con todo, se ha conformado

un ámbito territorialmente desarticulado, debido a la segregación, desorganización y superposición de distintos usos, lo que parece diagnosticado en las Directrices Regionales de Ordenación del Territorio (Gobierno del Principado de Asturias 1991).

En conclusión, Oviedo se constituye como el gran centro del ACA, en íntima relación con Gijón, su contrapunto en la jerarquía urbana. Es el único gran núcleo completamente especializado en la función pública y el sector servicios, que en este sentido representaba en 2002 el 77,6% del PIB y el 81,3% del empleo del concejo (Moro Vallina 2007). Su papel en el sistema territorial del Área Central no puede desligarse de la denominada depresión de Oviedo y la mezcla de usos que en tal ámbito se dan, consecuencia de las dinámicas metropolitanas y su posición anexa a la capital.

2.3.4.4. Las Cuencas Mineras

Las dos cuencas mineras del ACA (Mieres y la Cuenca del Caudal y la Ciudad Lineal del Nalón) han sufrido similares procesos de industrialización y reconversión industrial, con lo que cuentan con una posición comparable en el conjunto del sistema territorial del ACA. También con problemáticas territoriales similares.

Su desarrollo urbano y económico, hasta formar parte del denominado “ocho asturiano”, viene determinado por la actividad de extracción de la hulla y la consiguiente asociación de industrias, especialmente de tipo siderúrgico, a la actividad minera (Quirós Linares 1982). Se trataba de una actividad industrial básica basada únicamente en la extracción de materia prima y su posterior transformación inicial para la exportación. Hablamos así de un modelo económico especializado y dependiente que, una vez se hubo limitada la demanda exterior del material, entró en un imparable declive (Maurín Álvarez 1992a), especialmente debido a su escaso poder competitivo, cuyas razones explora Benito del Pozo (1990).

A diferencia de lo que ocurriese en el caso de Gijón y, con efectos más negativos, en Avilés, la reconversión industrial ha sido especialmente negativa en el caso de las Cuencas Mineras. Varias razones explican este hecho. En primer lugar, la notable dependencia, casi existencial, que en los dos casos se originó entre la actividad minerometalúrgica y el desarrollo económico y demográfico de estos ámbitos. Se trataba de entornos rurales, sustentados en pequeñas villas, que experimentaron un repentino desarrollo a causa del auge de la actividad minera y su asociada industria siderúrgica, a la que a continuación acompañó, en menor medida, otro tipo de industrias de menor tamaño.

Ese repentino desarrollo, sobre ámbitos que hasta entonces no habían adquirido un claro perfil urbano (Fig. 2.31), en lo que a población y funciones se refiere, derivó en una dependencia total de estos núcleos respecto a las actividades origen de tal crecimiento. En la práctica, esto supuso la construcción de numerosas barriadas obreras y el desarrollo en estos concejos de un empleo poco cualificado, muy concentrado en la actividad minerometalúrgica y que, por tanto, carecía de carácter emprendedor (Fernández Fernández 1992).



Figura 2.31. Aspecto urbano actual de La Villa, uno de los núcleos originarios de la actual ciudad de Mieres. Como se puede apreciar, se trata de un espacio que se asemeja más a la impronta rural de la mayor parte de las villas interiores de Asturias, que a un verdadero espacio urbano de cierta dimensión e importancia. Fuente: fotografía de autor

El carácter paternalista de la industria minerometalúrgica, que llevó incluso al desarrollo de economatos para la prestación de los bienes más elementales a la población trabajadora, acentuó esa dependencia. La consecuencia más elemental de todo ello ha sido un histórico letargo en el desarrollo del sector servicios de estos ámbitos (Fernández García 1992b; Rodríguez Gutiérrez y Menéndez Fernández 2003; Abad Aragón y Prada Trigo 2010), que sólo recientemente ha empezado a tener un impulso significativo.

El entorno geográfico sobre el que ambas cuencas se desarrollan ha resultado también determinante en su posterior evolución. Ambas se encuentran localizadas en el sector meridional de Asturias, más montañoso y alejado de la línea de costa. Se han visto así afectadas por el proceso de litoralización, tanto de la actividad industrial primero (Maurín Álvarez 1992a), como de la demanda residencial más tarde (Carrero de Roa 2011). Además, las difíciles condiciones topográficas de las Cuencas Mineras, desarrolladas sobre valles muy encajados (Fig. 2.32), ha hecho que la oferta de suelo apto para el desarrollo haya sido muy limitada en estas comarcas, lo que ha originado problemas a la hora de promover nuevos crecimientos, en la búsqueda de mayor diversificación y un giro en la economía de estos concejos (Benito del Pozo 1990; Abad Aragón y Prada Trigo 2010).

Lo anterior también ha contribuido a una usual convivencia entre actividades industriales y residenciales que, en general, conforman un conjunto urbano desorganizado, notablemente degradado y de muy baja calidad ambiental (Fernández García 1992b; Rodríguez Gutiérrez y Menéndez Fernández 2003). Se trata de un conjunto conformado por espacios industriales, algunos de ellos de carácter residual, grandes series de barriadas obreras, de escasa calidad y difícil integración urbana, junto a un importante desarrollo de infraestructuras lineares, tanto de carretera como de ferrocarril (Fig. 2.32). Un *totum revolutum* de difícil solución desde el punto de vista de la planificación urbana y que ha

acentuado la visión negativa de estos entornos, de cara a la atracción de nueva población residencial (Abad Aragón y Prada Trigo 2010; Tomé Fernández 2010).

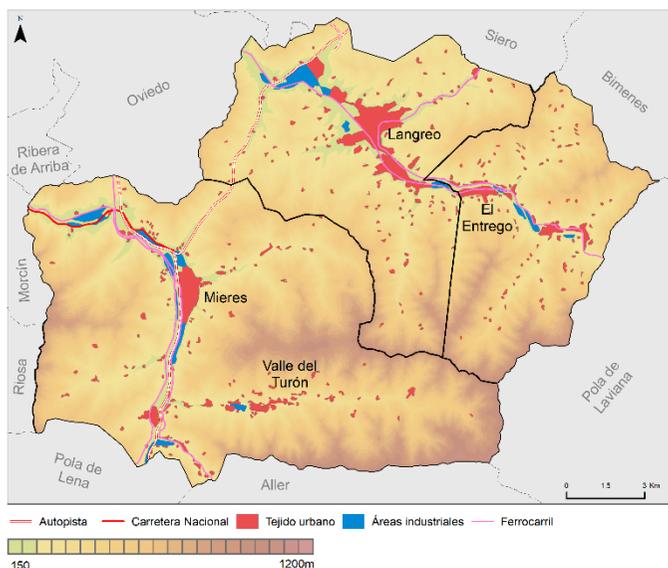


Figura 2.32. Mapa topográfico de los concejos de las Cuencas Mineras incluidos en nuestra delimitación del Área Central: Mieres, Langreo y San Martín del Rey Aurelio. Se puede comprobar como el poblamiento se desarrolla en el fondo de valle, debido a la complicada orografía de estos ámbitos. En ese espacio conviven actividades residenciales, industriales y un buen número de infraestructuras de comunicación. Fuentes: MDT5m; Mapa Topográfico Nacional 1:200.000 (IGN)

La reconversión industrial de estos ámbitos se ha sustentado fundamentalmente, bajo el auspicio de diferentes programas de ayuda y planificación económica públicos, en el desarrollo de nuevas bolsas de suelo industrial, en forma de polígonos (Benito del Pozo 2006), a fin de diversificar el sector. Sin embargo, la promoción de este nuevo suelo industrial, bajo ayuda pública, contó inicialmente con la competencia del sector norte del Área Central, beneficiario también de la planificación económica del Estado, al quedar incluido en el Polo de Desarrollo de Oviedo, o bajo las figuras de Zonas de Urgente Industrialización (ZUR) o las Zonas de Promoción Económica (ZPE) (Prada Trigo 2011b). Sólo en la última década, con la aprobación de los fondos mineros, se creó una partida específica destinada a la reconversión industrial de las Cuencas Mineras, en franca desventaja con el triángulo Oviedo-Gijón-Avilés y, por tanto, sin condiciones de competir con este bajo similares auspicios públicos.

Más allá del suelo industrial, los otros pilares en los que se ha sustentado la reconversión de estos ámbitos han sido una cierta promoción del sector servicios y un ligero fomento del turismo, enfocado al patrimonio industrial (Fig. 2.33) (Abad Aragón y Prada Trigo 2010). También en una tímida renovación y estructuración urbana de sus distintos centros de población (Tomé Fernández 2010). Estos núcleos, muy desarticulados en el pasado, aún presentan problemas de articulación territorial, consecuencia de la histórica falta de planificación y la enorme expansión de la actividad minerometalúrgica por todo el fondo de valle de estas cuencas.

Los nuevos pilares económicos entran en franca contradicción con la continuada apuesta industrial. Esto, en un entorno determinado por la escasez de suelo que, por

tanto, supone la imposibilidad de desconexión física de ambas actividades, actúa como lastre de cara a la renovación de la imagen de estos ámbitos y su definitiva apuesta por el fortalecimiento del sector servicios (Abad Aragón y Prada Trigo 2010).



Figura 2.33. Antigua torre de refrigeración de la fábrica siderúrgica de la empresa Duro Felguera, hoy en día reconvertida en símbolo del Museo de la Siderurgia de Langreo. Fuente: www.wikimedia.org

La reutilización de los antiguos espacios industriales ha sido una constante en todas las dinámicas y cambios anteriores, cuya plasmación más reciente es el Plan Territorial Especial de Recuperación de los Terrenos de HUNOSA en las Cuencas Mineras (Gobierno del Principado de Asturias 2006b). De este modo, la tradicional falta de suelo apto para el desarrollo en estos ámbitos, consecuencia de su complicada topografía, ha hecho que el desarrollo de los nuevos usos residenciales e industriales se haya realizado fundamentalmente a partir del aprovechamiento de terrenos en desuso, propiedad de las industrias minerometalúrgicas del pasado.

El desarrollo de nuevas infraestructuras de comunicación ha sido también una de las claves del cambio promovido en las últimas décadas. La promoción de las mismas ha intentado dar solución al enclavamiento que algunos autores han asignado a las Cuencas, fundamentalmente al valle del Nalón (Rodríguez Gutiérrez y Menéndez Fernández 2003). Sin embargo, más que actuar como acicate de desarrollo, las nuevas infraestructuras de comunicación parece que no han hecho más que favorecer la dependencia de las Cuencas Mineras hacia el sector septentrional de la región, dependencia fundamentalmente ejercida por Gijón, Oviedo y el nudo metropolitano (Tomé Fernández 2010). De hecho, recogiendo la tesis de Tomé Fernández (2010), se ha producido en estos ámbitos una disociación entre los mercados de trabajo y de residencia. El primero, consecuencia de la promoción institucional, ha evolucionado positivamente. Sin embargo, el segundo, ante el escaso atractivo de estos centros de población y su proximidad a los principales núcleos del Área Central, no ha dejado de mermar, sin poner fin a la constante sangría demográfica iniciada en los años 60.

Con todo, las Cuencas Mineras han ido paulatinamente perdiendo importancia en la conformación del sistema territorial del ACA. Han pasado de ser su centro industrial, a

una situación de dependencia cada vez mayor de los principales núcleos de la región y, fundamentalmente, de Gijón y Oviedo. Su reconversión industrial, si bien ha generado resultados positivos y una diversificación de su economía, aún no ha conseguido una ruptura total con el anterior modelo económico. De hecho, la gran industria sigue viéndose como uno de los motores y apuestas de desarrollo (Prada Trigo 2011a), lo que impide un cambio de imagen de estos ámbitos y un giro económico similar al que, con ciertas luces y sombras, se ha iniciado en Avilés (Prada Trigo 2012). Ese modelo económico heredado sigue haciendo a estas comarcas especialmente débiles a la deslocalización industrial, de manera similar al proceso que hemos descrito para el caso de Avilés.

A) Mieres y la Cuenca del Caudal

A diferencia de la Ciudad Lineal del Nalón, la actividad minera e industrial no dio lugar aquí a la generación de un continuo urbano asimilable al que se da en las márgenes del río Nalón. Mieres actúa en este ámbito como núcleo urbano principal, al que se vinculan todo un conjunto de entidades de población secundarias, que dependen funcionalmente de la ciudad principal (Fernández García 1992a). Estas entidades de población se distribuyen por los valles de Turón, Aller y Lena, formando un conjunto urbano laxo muy expandido que, sin embargo, no ha terminado por formar un continuo urbano único y conectado (Fig. 2.32).

Frente a la mayor diversidad de la actividad industrial de la cuenca del Nalón, en Mieres y el entorno del Caudal la actividad minera era la mayoritaria, con casi un 50% de los trabajadores empleados en la extracción de la hulla en 1970, representando esta actividad el 53.6% del PIB del municipio en 1980 (Benito del Pozo 1990). Junto a la minería, ejercía el otro papel protagonista la siderurgia que, sin embargo, y a diferencia de lo que ocurrió en el valle del Nalón, no desarrolló actividades en el subsector de los transformados (Benito del Pozo 1990). De esta forma, el cierre de esa fábrica siderúrgica, por el traslado de su actividad a la fábrica de UNINSA en Gijón, unido al declive de la actividad minera, incidió en los duros efectos del declive industrial en la comarca.

Con todo, la desindustrialización de la cuenca del Caudal se saldó con un declive económico y demográfico continuo, que aún continúa hoy en día. Ésta se ha cebado especialmente en los núcleos urbanos secundarios de los valles de Turón, Aller y Lena y, sobre todo, en el entorno rural inmediato, que concentra el mayor número de entidades deshabitadas de Asturias (Fernández García et al. 2007).

Sucesivas políticas públicas de planificación económica han intentado proporcionar una solución a ese declive, sin éxito. Estas políticas se han plasmado en la promoción de suelo industrial en la comarca y, de manera más reciente, en la promoción de equipamientos y servicios públicos, como una facultad universitaria (Fig. 2.34), un hospital comarcal o un centro comercial (Rodríguez Gutiérrez et al. 2009).

Rodríguez Gutiérrez et al. (2009) señala la privilegiada accesibilidad de esta comarca, en la entrada por carretera y ferrocarril de la Meseta a Asturias, como uno de sus puntos fuertes, que se debe de utilizar en su futura estrategia de desarrollo. No obstante, ya se

ha señalado anteriormente el peligro que tal accesibilidad juega en la creciente dependencia de la comarca respecto al binomio Oviedo-Gijón.



Figura 2.34. Instalaciones de la Universidad de Oviedo en Mieres. Se trata de la única facultad universitaria localizada fuera de Oviedo y Gijón. El complejo queda compuesto, de izquierda a derecha, por un edificio de investigación, la Escuela Politécnica de Mieres y un complejo deportivo universitario. Fuente: <https://epm.uniovi.es>

B) La Ciudad Lineal del Nalón

La actividad industrial ha dado lugar en el valle del Nalón a la generación de un continuo urbano (Fig. 2.32), que se ha terminado como conocer como la Ciudad Lineal del Nalón (Rodríguez Gutiérrez y Menéndez Fernández 2003). No obstante, se pueden señalar similares problemas de desorganización, mezcla de usos y degradación ambiental que los apuntados anteriormente para la cuenca del Caudal (Abad Aragón y Prada Trigo 2010). De hecho, se encuentran aquí incluso más agravados, si bien existen dinámicas diferentes en función del espacio considerado en el conjunto de la cuenca (Rodríguez Gutiérrez y Menéndez Fernández 2003).

Aunque la dependencia en el sector minero y siderúrgico fue también notable en el valle del Nalón, la economía industrial fue siempre en este espacio más diversificada, lo que le permitió afrontar en unas condiciones levemente más optimistas el proceso de reconversión industrial (Benito del Pozo 1990). De esta manera, en la comarca del Nalón ha existido tradicionalmente una potente industria transformadora de metales que, sin bien en continuo declive, no sufrió un retroceso tan trágico como el de la minería y la siderurgia, lo que le permitió al valle una atonía algo más lenta.

Del mismo modo, aunque las estrategias de reconversión industrial han sido similares en ambas cuencas, puede decirse que la Ciudad Lineal del Nalón cuenta con más éxitos a sus espaldas. Entre ellos, sobresale Valnalón (Ciudad Industrial del Valle del Nalón). Es una empresa pública que ha promovido, entre otros, un centro de empresas (el primero de Asturias), un polígono industrial y un centro de formación (Prada Trigo 2011a). Estas iniciativas han contribuido a la diversificación del tejido productivo de la comarca. En la sección tecnológica de Valnalón ubica Tomé Fernández (2010) hasta cuatro empresas de software y comunicación, creadoras de 750 empleos. Con todo, Valnalón se ha

convertido en el punto más dinámico de la comarca del Nalón, además de una experiencia de recuperación socioeconómica que ha alcanzado prestigio en Europa (Fernández García et al. 2007).

La mejora de las comunicaciones, señaladas en el pasado para este valle como uno de sus principales problemas (Rodríguez Gutiérrez y Menéndez Fernández 2003; Martínez Fernández y Mínguez González 2005), ha mejorado la accesibilidad de la comarca. Esta, además, ha promovido una revalorización de su patrimonio industrial desde un punto de vista turístico, aprovechando su condición como lugar de paso al Parque Natural de Redes. Sin embargo, pese a todo a ello, la tendencia general es de declive demográfico, similar a la apuntada para Mieres, y de una cada vez mayor dependencia con los principales centros urbanos del centro de la región.

El mayor equilibrio urbano en todo el valle permite, aún con ciertos contrastes en sus dinámicas evolutivas, un cierto mantenimiento del mismo, al completo, en condiciones similares. Esta situación contrasta con el papel centralizador ejercido por Mieres en la cuenca del Caudal y el mantenimiento de su centro urbano a partir del paulatino abandono de su entorno rural más inmediato.

2.3.5. LAS VILLAS Y EL ESPACIO RURAL DEL ACA

Consecuencia de la orografía del territorio asturiano, el ACA se caracteriza por la existencia de numerosos espacios de carácter rural entre el conjunto de centros urbanos y funcionales anteriormente señalados. Es así acertada la definición planteada en la propuesta de las Directrices Subregionales de Ordenación del ACA (Gobierno del Principado de Asturias 2016), que define el Área Central de Asturias como “una metrópolis de prados y bosques, jalonada con espacios de dominante rural, que conviven y se entremezclan con las áreas urbanas más transformadas procurándoles amenidad, productos agroalimentarios y los servicios ambientales esenciales para su metabolismo”.

El componente rural y natural se mantiene allí donde la orografía ha impuesto una menor accesibilidad y mayores dificultades al aprovechamiento urbanístico, industrial o agropecuario. Y, dentro de éstos, en aquellos lugares más alejados de los principales centros de radiación de funciones urbanas.

Consecuencia de las distintas condiciones topográficas y de accesibilidad y proximidad a los principales centros urbanos, la ruralidad del Área Central presenta una variedad de situaciones muy heterogénea. Ésta va desde el ámbito rural transformado y que ha ya pasado a formar parte de los centros urbanos y funcionales descritos en la sección anterior, a aquellos ámbitos plenamente rurales, que aún conservan parte del modo de vida tradicional. En posiciones intermedias, se encuentran ámbitos afectados por la localización de usos de rechazo, junto a otros donde aún perviven villas y centros de población de cierta significatividad, pero sin una dependencia tan sumamente marcada respecto al centro regional.

2.3.5.1. La ruralidad residual

En las áreas más llanas y favorables al desarrollo de la actividad humana, se ha ido produciendo una progresiva ocupación del territorio por parte de actividades de carácter urbano. Éstas han sido paulatinamente expulsadas de las ciudades, consecuencia de las mejoras de accesibilidad y transporte, la tercerización de las mismas tras la crisis industrial de los 70, así como debido a políticas de planificación y especulación, que favorecen suelos periféricos de menor valor, grandes dimensiones y prestaciones. Se trata del fenómeno conocido como periurbanización o ciudad difusa (Fernández García 2003a).

En el ACA, ha sido el entorno de los centros urbanos más dinámicos, es decir, el triángulo Oviedo-Gijón-Avilés, el más afectado por estos procesos. También los ámbitos más próximos a la costa, consecuencia del atractivo de ésta. Especialmente para el caso de los usos residenciales, debido al alto valor ambiental de estos espacios.

Se trata también de los ámbitos topográficamente más favorables, correspondientes a la rasa costera en el caso litoral y al denominado surco prelitoral para el caso del nudo metropolitano. En la parte meridional del Área Central, la disposición del relieve en forma de cadenas montañosas y valles encajados, ya completamente urbanizados consecuencia de la presión demográfica e industrial promovida durante el auge de la actividad minerometalúrgica, impide el desarrollo de fenómenos similares al anteriormente planteado.

Con todo, los efectos de la periurbanización en estos ámbitos han sido enormes, lo que les ha llevado a perder su condición rural previa. En el cambio, han pasado a formar parte del sistema dirigido por los núcleos urbanos y funcionales descritos en la sección anterior. Tal es el caso del nudo metropolitano, en el que anidan polígonos industriales, equipamientos de carácter supramunicipal y un fenómeno de segunda residencia especialmente desarrollado, que se ha llegado a plasmar en la aparición de urbanizaciones de gran tamaño y completamente desconectadas de la ruralidad preexistente (Fig. 2.30) (Herrán Alonso 2002).

La franja periurbana de Gijón ha sufrido también este fenómeno con especial incidencia (Fig. 2.35), al igual que el entorno comarcal de Avilés. En ambos casos son los espacios residenciales y equipamientos de ocio y servicios los que más recientemente han transformado esa franja rural

La posición de ambos espacios en la franja costera explica en buena parte este tipo de dinamismo. De hecho, en el caso de Avilés, ha sido el concejo de Castrillón, próximo a la costa y con numerosos núcleos rurales y, por tanto, espacios propicios para la edificación unifamiliar, el que ha presentado una tendencia demográfica más positiva de toda la comarca (Rodríguez Gutiérrez et al. 2009). En el caso de Gijón, el atractivo residencial se ha concentrado fundamentalmente en el área rural oriental del concejo. Es la zona con la mayor calidad ambiental de toda la comarca y donde ya no aparece actividad industrial significativa, considerada incompatible con los usos de tipo residencial. El fenómeno residencial en Gijón se ha ido expandiendo hacia el este, hasta alcanzar a su concejo vecino,

Villaviciosa, fruto de la mejora de accesibilidad con la apertura de la autovía del Cantábrico.



Figura 2.35. Incidencia del fenómeno periurbano a base de vivienda unifamiliar en la parroquia de Deva, Gijón. Fuente: Google Maps

En lo que respecta a Oviedo, pueden apuntarse realidades similares a las consideradas en los casos de Avilés y Gijón para gran parte del concejo. Claros ejemplos son la falda este del monte Naranco, en contacto con la ciudad, el entorno de Las Caldas y San Claudio en la parte occidental o La Manjoja y San Esteban de las Cruces hacia el sur (Fig. 2.36).

Especial interés reviste al respecto el monte Naranco. En tanto que espacio montañoso, aunque no sea muy elevado, presenta complicaciones para el desarrollo del fenómeno periurbano. Éste ha afectado de manera significativa a su falda, la más accesible y de menor pendiente. El resto de la ladera, en pleno contacto con la ciudad, a pesar de conservar parte de sus valores ambientales y naturales, ha ido variando su función. Ha pasado así de ser un espacio rural de carácter montañoso, asimilable al de otros ámbitos de la región, al de ejercer funciones de parque metropolitano o, mejor dicho, ámbito de ocio del centro urbano y funcional dirigido por Oviedo (INDUROT 2006).

Para todo este conjunto de ámbitos, afectados por los procesos de periurbanización y la influencia directa de los principales centros urbanos y funcionales del Área Central, el espacio rural representa un papel marginal. Sus cambios y dinamismo quedan únicamente explicados por la relación de estos espacios con la de los centros de los que dependen. De este modo, si bien se trata de espacios con características propias y dinámicas singulares, su interpretación se realiza como parte del centro urbano y funcional del que forman parte, al recibir la actividad irradiada por éste.



Figura 2.36. La Bolgachina, en el contacto entre la ciudad de Oviedo y su entorno rural. Muestra la notable incidencia que el fenómeno periurbano ha tenido en este ámbito. Fuente: www.flickr.com

2.3.5.2. La ruralidad patente

Junto a aquellos espacios notablemente transformados, encontramos otros espacios, los menos accesibles y de condiciones topográficas más duras, donde la irradiación del fenómeno urbano no ha sido tan clara. Ésta, en efecto, no guarda grandes diferencias con la que se ha producido en otros ámbitos de Asturias.

Es el caso de los núcleos rurales del área meridional del Área Central, donde la orografía complica las comunicaciones y limita el aprovechamiento del suelo. El entorno montañoso localizado entre los valles mineros (Nalón y Caudal) es un buen ejemplo de ello. También la mayor parte de los concejos de Morcín y Riosa. Específicamente, aquella parte que se adentra hacia el interior de los mismos y que se aleja de las principales infraestructuras de comunicación del ámbito. Estas son, por un lado, la N-630, principal vía de penetración del reciente fenómeno periurbano. Junto a ella, la AS-231, en el valle del río Riosa, vinculada al auge de la actividad minera (pozo del Monsacro) que, al igual que en las dos principales cuencas hulleras de la región, pobló el escaso fondo de valle de población y barriadas obreras, asumiendo la ruralidad allí existente y hoy en día desaparecida.

Sin embargo, para el resto de esos concejos, así como para el apuntado intermedio montañoso de las cuencas hulleras, podemos hablar de espacios de acusada ruralidad que, por tanto, conservan un cierto modo de vida tradicional. Al menos asimilable a la situación de los ámbitos rurales para el conjunto de Asturias, cada vez más transformados consecuencia del envejecimiento, fenómenos de carácter urbano como el turismo y la segunda residencia, así como por el paulatino receso de la actividad agropecuaria.

Varios autores señalan la escasez de núcleos rurales que conservan su tipología tradicional en el ACA (Carrero de Roa 2012; Gobierno del Principado de Asturias 2016). Sin embargo, no cabe asumir este fenómeno como específico y propio del Área Central, sino

como parte del proceso de urbanización y declive rural iniciado en el desarrollismo y con consecuencias para el espacio rural de todo el país.

En la parte septentrional del Área Central, la ruralidad se empieza a hacer más patente a medida que nos alejamos de los principales centros de actividad y, especialmente, de las vías de comunicación más rápidas. En el caso concreto de las autovías, a medida que nos alejamos de los enlaces que permiten su acceso. Son bolsas rurales los entornos que quedan en la margen de Avilés-Llanera-Oviedo por occidente, entre los que queda circunscrito la práctica totalidad del concejo de Las Regueras; así como los espacios localizados entre Gijón y Siero, en el oriente (Fig. 2.37). Si bien se pueden apreciar en estos espacios ciertas edificaciones y usos ajenos a los propiamente rurales, son estos aún limitados y poco significativos. Para el caso del ámbito interior entre Gijón y Siero, la vía rápida AS-I, entre Oviedo y Gijón, recientemente inaugurada, puede significar un primer paso para la expansión del fenómeno periurbano sobre parte de este ámbito.



Figura 2.37. Espacio de clara índole rural en el entorno de la AS-248, que une los núcleos de Gijón y Pola de Siero. Fuente: fotografía de autor

2.3.5.3. Los usos de rechazo

La conquista urbana de territorio rural es paralela a la utilización de parte de ese espacio rural, aquel perteneciente al rural patente y, por tanto, de menor accesibilidad y con condiciones topográficas menos favorables, para la ubicación de actividades de rechazo (Fernández García et al. 2007). Se trata de actividades que, si bien generan rechazo por parte de la población, buscan proximidad a los principales centros de actividad. Se ubican así en puntos donde la accesibilidad y topografía desfavorable se combina con una cierta proximidad a los centros funcionales del Área Central

De esta manera, podemos ubicar en el centro del Área Central, cerca del punto de unión de la autopista “Y”, algunos de los equipamientos de rechazo más significativos: el vertedero del Área Central y el centro penitenciario de Villabona (Fig. 2.38). Al norte de

Noreña se ubica, por su parte, el cuartel militar Cabo Noval. Cabe añadir a éstos el conjunto de explotaciones mineras a cielo abierto que jalonan la mayor parte del Área Central, aunque alejadas de sus principales nodos de actividad. De este modo, ubicada una en el Naranco, lo hace en su falda oeste, la que da la espalda a la ciudad de Oviedo.



Figura 2.38. Localización del vertedero central de Asturias, gestionado por COGERSA, y de la cárcel de Villabona. Se encuentran localizados en una posición central respecto al conjunto del ACA (nudo de la autopista “Y”), pero en un ámbito de menor accesibilidad y carácter más rural. Fuente: PNOA Máxima Actualidad (IGN)

2.3.5.4. Las villas de carácter intermedio

En el espacio intermedio entre los principales centros urbanos y funcionales del Área Central y aquellos espacios de ruralidad patente, se localizan una serie de pequeños núcleos urbanos, con cierta capacidad de influencia sobre su entorno y un cierto grado de autonomía respecto a los nodos metropolitanos. De este modo, si bien quedan influidos por éstos, tal influencia no llega a ser tan determinante como en el caso de aquellos ámbitos directamente afectados por el fenómeno de la periurbanización.

Las villas de Candás y Luanco, por su localización costera y, por tanto, favorable al desarrollo de la segunda residencia y actividad de tipo turístico, constituyen quizás los núcleos más significativos al respecto. Aunque con una dependencia respecto a Gijón creciente, Candás aún mantiene dinámicas propias y una cierta autonomía. Estas características son aún más marcadas para el caso de Luanco (Fig. 2.39), por su localización periférica respecto a la principal vía de accesibilidad del centro de Asturias (la autopista “Y”), así como por localizarse a cierta distancia de los dos nodos urbanos más próximos: Avilés y Gijón.

La actividad terciaria, vinculada al ocio y al turismo, así como la segunda residencia, son quizás los puntos diferenciadores para ambas villas y sus entornos, que consiguen introducir en ellas dinámicas propias y no completamente dependientes de lo que ocurre en las ciudades metropolitanas más próximas.

En conjunto, ambas villas y sus entornos, que cubren gran parte del territorio de los concejos de los que son capital (Carreño y Gozón), conforman una isla en el centro superior de la región, el Cabo Peñas, con un dinamismo y lógica territorial diferente a la del triángulo Avilés-Gijón-Oviedo. De ahí que la delimitación de la denominada “Ciudad Astur” realizada por Rodríguez Gutiérrez et al. (2013) excluya el Cabo Peñas.



Figura 2.39. Vista de la villa de Luanco. Al fondo, en la parte derecha de la fotografía, se pueden apreciar recientes urbanizaciones residenciales, orientadas en parte al fenómeno de la segunda residencia. Fuente: www.flickr.com

La ausencia de autovías o vías rápidas en este ámbito, relegado desde el punto de vista de la accesibilidad por el diseño de la autopista “Y”, es quizás el factor clave que explica esta singularidad territorial. De hecho, para finales del siglo XX, Madera y Alvargonzález (1992) aún apuntan el mantenimiento de la fisonomía rural para este espacio, recientemente perdida consecuencia del desarrollo del turismo y el fenómeno de la segunda residencia.

Al sur, estas villas intermedias no poseen un papel tan evidente y disociado del existente en los centros funcionales de su entorno. Sin embargo, aún puede señalarse para algunos casos ese papel intermedio y, en cierta medida, transitorio, que ejercen entre los nodos metropolitanos más próximos. Tal es el caso de Santolaya de Morcín y su entorno.

Los desarrollos residenciales e industriales de este ámbito están sin duda asociados a las dinámicas que se originan en el nudo metropolitana del Área Central. También a la actividad minera que caracterizó el desarrollo de las cuencas hulleras asturianas en el siglo XX. Sin embargo, dista la suficiente distancia entre Santolaya y todos esos centros como para considerar a esta villa, capital del concejo de Morcín, como una con entidad y personalidad propia dentro del Área Central.

Finalmente, aparecen en los bordes del Área Central otras villas periféricas, de notable entidad urbana y cierto dinamismo. Ejercen su papel como vínculo funcional entre el centro de la región (Rodríguez Gutiérrez et al. 2013), caracterizado por una economía de servicios e industrial, y las alas, de dominante rural. De este modo, las dinámicas de estos núcleos, sin bien específicas y singulares, quedan también en relación con el sistema urbano del centro de la región y la influencia ejercida por éste.

2.3.6. UNA CARACTERIZACIÓN TEMÁTICA DEL ÁREA CENTRAL

2.3.6.1. Tipos y dinámicas de los usos residenciales

Al hablar del fenómeno residencial en el ACA, cabe distinguir distintas tipologías de poblamiento, así como diferentes procesos de urbanización del territorio (Fig. 2.40). Esta caracterización nos permite entender cómo se produce la urbanización del ACA y qué motivos guían la edificación de vivienda en cada caso.

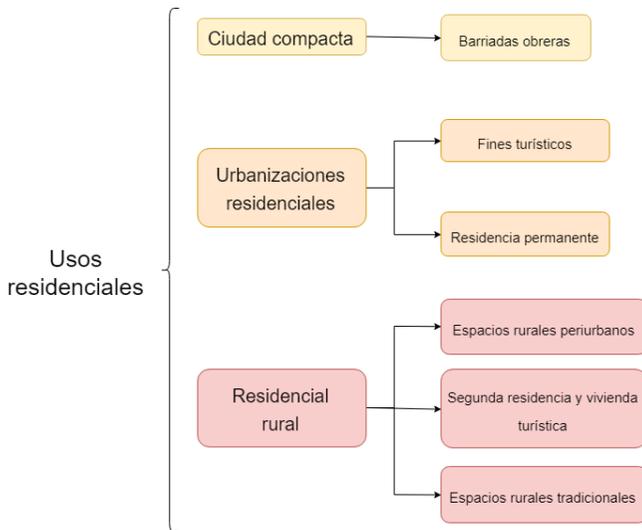


Figura 2.40. Propuesta de clasificación de los usos residenciales del Área Central de Asturias en distintas tipologías. Fuente: elaboración propia

En primer lugar, diferenciamos las ciudades o centros urbanos compactos. Es decir, espacios urbanizados al modo tradicional, en el que un conjunto de edificios de orientación mayoritariamente residencial conforma un centro de población, dotado de un buen número de servicios y una alta accesibilidad.

En el caso de aquellos centros ubicados en la posición superior de la jerarquía urbana, el crecimiento de estas ciudades compactas es imparable. El tejido urbano de la ciudad se va expandiendo progresivamente, multiplicando su tamaño inicial. Los desarrollos residenciales de La Corredoria en Oviedo (Fig. 2.29), como expansión al norte de esta ciudad; Nuevo Roces en Gijón, como continuación al sur de este último centro urbano, o la Magdalena Residencial en Avilés, son buenos ejemplos de este tipo de crecimiento residencial. Su motor viene a ser la economía de escala ejercida por los centros urbanos de los que suponen su expansión y, en este sentido, los servicios que de éstos reciben.

Dentro de esta ciudad compacta, cabe distinguir aquellos barrios de carácter obrero, fruto del proceso industrializador de la segunda mitad del siglo XX. Cuentan con características singulares, como la escasa mezcla de usos, baja calidad de las viviendas y procesos de guetificación. Todos estos factores los convierten en espacios residuales, de escaso atractivo y que, por tanto, llegan a actuar, en algunos casos, como imanes repelentes de

los nuevos desarrollos residenciales. Las Cuencas Mineras cuentan con un buen número de ejemplos de este tipo de barrios, al igual de Avilés y su comarca. Para el último ámbito, La Luz o Llaranes (Fig. 2.23) pueden considerarse como ejemplos paradigmáticos de barriada obrera.

A los centros urbanos compactos, cabe sumar las urbanizaciones surgidas como consecuencia del proceso de periurbanización previamente descrito en este capítulo. Se encuentran conformadas a partir de tipologías de vivienda unifamiliar. Sin embargo, a diferencia de la vivienda unifamiliar rural, estas urbanizaciones conforman un conjunto residencial definido, coherente y en el que, además, se desarrollan infraestructuras de carácter viario, e incluso servicios que soportan las demandas del conjunto residencial.

Se puede tratar de urbanizaciones de vocación residencial, fundamentalmente ubicadas en el nudo metropolitano de la región, o bien de urbanizaciones con fines turísticos, localizadas en la franja costera. En ambos casos, su desarrollo es habitualmente fruto de la iniciativa privada, en ámbitos concretos, donde el planeamiento lo ha permitido, e instantáneo, en el sentido de que, en su conjunto, son diseñados y desarrollados en un único momento como consecuencia de la actuación del mismo promotor. No obstante, pueden existir sucesivas ampliaciones del mismo espacio residencial. La urbanización de la Fresneda o de Soto de Llanera (Fig. 2.30) en el nudo metropolitano, son ejemplos de urbanizaciones de vocación residencial, mientras que Perlora (Fig. 2.41) y Xivares, en el concejo de Carreño, se constituyen como típicas urbanizaciones de segunda residencia y vivienda turística.



Figura 2.41. Urbanización de Perlora, en el concejo de Carreño. Fue promovida por la Obra Sindical de Educación y Descanso, durante el régimen franquista, para servir de ciudad turística para la población obrera. Hoy en día se encuentra abandonada y sin uso. Fuente: www.elcomercio.es

En el campo rural, las tipologías residenciales son distintas a las anteriormente descritas. En estos ámbitos predomina la vivienda aislada, normalmente asociada a un terreno de cierta extensión, ya sea para fines agropecuarios, como en su versión tradicional, o para fines de recreo y ocio familiar, como en su concepción actual.

Entra ello en relación con la típica organización del espacio rural asturiano descrita por García Fernández (1980). Éste acuña el término “aldea de elementos disociados” para referirse a los poblados de carácter rural de Asturias, conformados a partir de la agrupación de varias viviendas dispuestas de manera bastante laxa, sin presentar una agrupación contigua. De este modo, estas aldeas se encuentran conformadas por quintanas, unidades de poblamiento conformadas por la vivienda en sí, pero también por espacios de carácter productivo vinculados a las mismas (García Fernández 1980). Tales espacios separan unas quintanas, y sus consiguientes viviendas, de otras, dando lugar a esa aldea de elementos disociados, de disposición laxa.

En la rasa costera, así como en las sierras y lomas prelitorales, en el espacio vacío entre unas aldeas y otras aparecen también pequeñas viviendas aisladas que, a diferencia del caso anterior, no tienen por qué estar asociadas a un espacio productivo anexo. Se trata de un hábitat de tipo intercalar (Maurín Álvarez 1992b), sobre el que se ha desplegado la esencia del fenómeno periurbano y, vinculado al mismo, el desarrollo de la segunda residencia.

Según las dinámicas que hayan determinado la evolución y crecimiento de este tipo de espacios de poblamiento rural, distinguimos distintas tipologías de espacios residenciales rurales. En primer lugar, encontramos aquellos espacios rurales directamente afectados por el fenómeno de la periurbanización, los cuales han sido crecientemente urbanizados a partir de vivienda unifamiliar. Copan el espacio rural circundante de los centros urbanos y funcionales más dinámicos. De este modo, la población residente en estos espacios busca vivienda en el ámbito rural, en la búsqueda de una mayor calidad ambiental, así como de un precio del suelo más barato. Carecen de cualquier tipo de espacio productivo y dominan en ellos tipologías arquitectónicas diferentes a las tradicionales. Todo el entorno de Oviedo es un caso paradigmático de este tipo de espacio residencial rural (Fig. 2.36), al igual que el conjunto que conforma el nudo metropolitano.

En conexión con el proceso anterior se encuentra la proliferación de vivienda unifamiliar en relación con la demanda turística y, sobre todo, de segunda residencia. Se ubica preferentemente en la franja costera y en zonas de elevada calidad ambiental y paisajística. Los concejos de Gozón y Carreño son quizás el ejemplo más característico de este tipo de vivienda rural. En Gijón, si bien existe, se mezcla con el fenómeno periurbano, fruto de la influencia ejercida por la propia ciudad sobre su entorno más inmediato.

Finalmente, nos encontramos con los espacios rurales más tradicionales, que han conservado mejor la morfología descrita por García Fernández (1980). Si bien han ido sufriendo numerosas transformaciones, y cada vez aparecen en ellos un mayor número de viviendas residenciales desconectadas de la economía agraria (Gobierno del Principado de Asturias 2016), no se produce en ellos un proceso paulatino de edificación de todo el suelo rural circundante. En consecuencia, estos núcleos no se van expandiendo de manera significativa, ni tampoco confluyen con los núcleos rurales vecinos, de los que, por tanto, se mantienen independientes.

Su menor accesibilidad es normalmente la causa que se encuentra detrás de estas dinámicas, tan contrastadas con las planteadas anteriormente. Recientemente, la especial figura de planeamiento existente para parte de estos ámbitos determina también su particular evolución.

En la mayor parte de las tipologías residenciales descritas, la planificación de la edificación se realiza según lo indicado en los Planes Generales de Ordenación Urbana (PGOU) de cada concejo. Estos realizan una tradicional delimitación del suelo entre suelo urbano consolidado, urbanizable y no urbanizable. Los núcleos rurales, sin embargo, son objeto de un instrumento de planificación particular (Fig. 2.42). La definición de estos núcleos rurales se realiza de acuerdo con la planificación municipal (PGOU o normas subsidiarias) o bien por medio del catálogo de núcleos rurales, cuya realización recoge el Decreto 1/2004 (Gobierno del Principado de Asturias 2004). No obstante, éste aún no se ha llegado a elaborar.

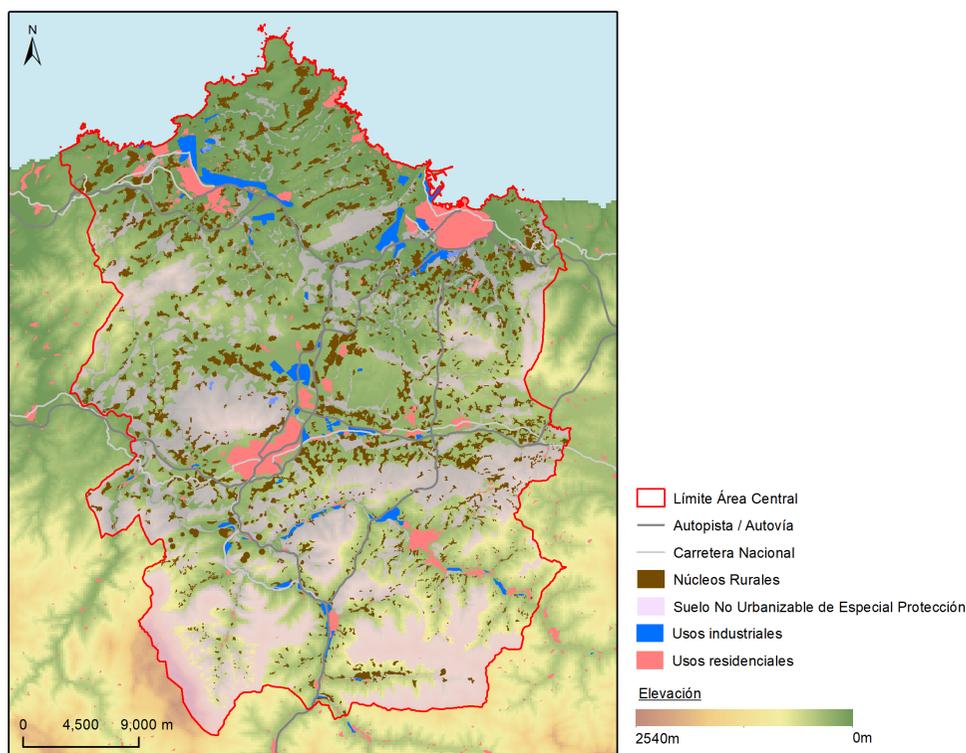


Figura 2.42. Delimitación de los núcleos rurales y del suelo no urbanizable de especial protección vinculado a los mismos incluida en la planificación urbanística de los concejos del Principado de Asturias. Fuentes: Mapa Topográfico Nacional 1:200.000; MDT200m; Líneas límite municipales (IGN); Mapa Urbanístico de Asturias (SITPA-IDEAS).

El Decreto 1/2004, al igual que el “Marco de criterios, requisitos y condiciones para la catalogación de los núcleos rurales en el Principado de Asturias” (Gobierno del Principado de Asturias 2003), considera este poblamiento rural como un espacio digno

de protección y, por tanto, sujeto a regulaciones específicas. Aunque se establecen distintos tipos de protección, el instrumento limita en cualquier caso la edificación en estos espacios, lo que construye en ellos la aparición de dinámicas urbanizadoras similares a las que podrían ser apuntadas para las tipologías residenciales anteriormente apuntadas.

Finalmente, en función del grado de protección de esos núcleos rurales, su entorno circundante merece la consideración de suelo no urbanizable o suelo no urbanizable de especial protección (Fig. 2.42) (Fernández García et al. 2007), lo que supone la menor predisposición de esta última categoría a cualquier tipo de variación en los cambios de usos y coberturas del suelo que no sea de origen natural o debido a razones de carácter agrícola/ganadero.

2.3.6.2. Tipos y dinámicas de los usos industriales

Al igual que para el caso de los usos residenciales, diferenciamos también distintas tipologías de suelo industrial (Fig. 2.43). Éstas, se encuentran en buena medida relacionadas con los diferentes momentos históricos de producción de ese espacio industrial.

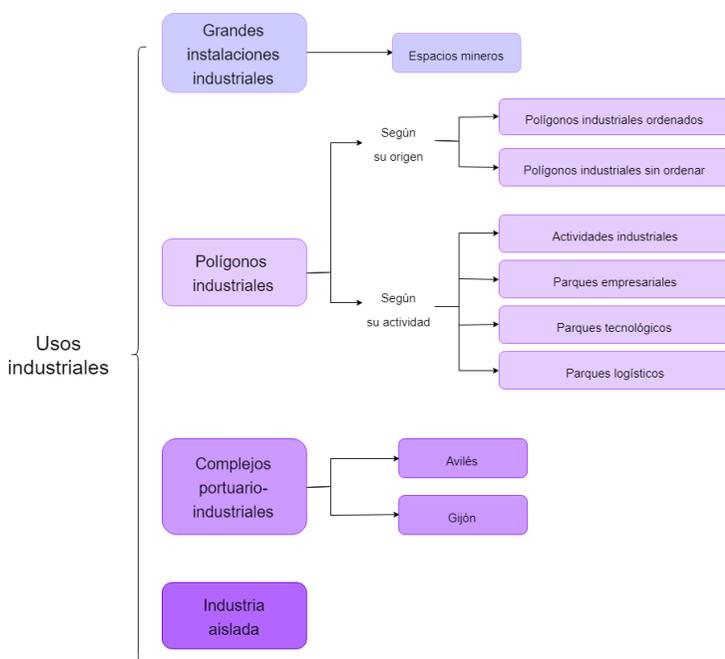


Figura 2.43. Propuesta de clasificación de los usos industriales del Área Central de Asturias en distintas tipologías. Fuente: elaboración propia

Para esa clasificación del tipo de suelos industriales nos basamos en las propuestas de tipologías de espacios industriales recogidas en el Avance de la Revisión de las Directrices Regionales de Ordenación del Territorio del 2006 (Gobierno del Principado de Asturias 2006a) y en la propuesta de Directrices Subregionales de Ordenación del Área central de Asturias de 2016 (Gobierno del Principado de Asturias 2016).

Realizamos en primer lugar una distinción entre las grandes instalaciones industriales, vinculadas usualmente a una única compañía, y el resto de usos industriales, más heterogéneos en lo que respecta al número de empresas que acogen, y normalmente constituidos en la forma de polígonos industriales.

En lo que respecta al primer tipo, hablamos de suelos industriales ocupados por una única empresa, normalmente en relación con la industria pesada, que realiza un uso muy intensivo del suelo. Se vinculan en la mayor parte de los casos al proceso industrializador de la primera mitad del siglo XX. Se trata así de suelos industriales ocupados por compañías con una gran capacidad de transformación territorial y cuya instalación, en muchos casos, ha tenido un efecto devastador sobre todo el entorno circundante.

Ejemplos de este tipo de suelo industrial son los complejos de Arcelor, Dupont (Fig. 2.44) o Química del Nalón. Por cuanto se trata de empresas ya constituidas y que desarrollan una producción que, en lo general, se mantiene estable en el tiempo, estos suelos no experimentan prácticamente cambios. Sólo en el caso de aquellas empresas obsoletas y que han sufrido un proceso de reconversión industrial se produce una cesión progresiva de ese suelo para otros usos, ya sea otra tipología de espacio industrial o bien con relación a otro tipo de actividad económica.



Figura 2.43. Imagen área del complejo industrial Dupont, ubicado en Tamón (Carreño). Fuente: PNOA Máxima Actualidad (IGN)

Como caso particular de este tipo de suelo industrial cabe mencionar los espacios mineros. Si bien no se ajustan del todo a las características planteadas, se corresponden también con morfologías similares. De esta manera, estos espacios han estado normalmente vinculados a industria pesada de carácter siderúrgico, químico, etc y han provocado una gran transformación territorial en su entorno inmediato. Además, cada empresa minera realiza también un uso muy intensivo del suelo que ocupa, con unas dinámicas de cambio similares a las últimas apuntadas, de reconversión del suelo industrial en desuso, lo que se encuentra en relación con el retroceso de la actividad minera y su anunciado cese a finales del presente año 2018¹.

¹ “Cuenta atrás para el carbón nacional”. Noticia del 7 de enero de 2018. Fuente: <http://www.elcomercio.es>.

Entre la segunda tipología de suelo industrial apuntada, encontramos una gran variedad de tipos de usos industriales, si bien todos ellos con características y dinámicas similares. Se trata de espacios urbanizados para la localización de diferentes empresas a partir de edificaciones en nave, incluyendo en algunos casos servicios para esas empresas y, en la mayor parte de las ocasiones, proporcionando suelo barato. Estos factores, junto a la accesibilidad y proximidad a los principales centros funcionales de la región, determinan su evolución y progresiva colmatación. Como norma general, aquellos espacios mejor situados y cerca de los principales centros funcionales e industriales de la región, muestran un mayor dinamismo, produciéndose antes la colmatación del suelo industrial disponible.

Según su origen, planificado o no, podemos diferenciar entre polígonos industriales ordenados o sin ordenar. Entre estos últimos, es habitual su crecimiento en torno a los ejes viarios, en la búsqueda de la accesibilidad proporcionada por las principales vías de comunicación. El corredor industrial a lo largo de la Nacional 634, entre Colloto y El Berrón (Fig. 2.44), es un ejemplo del último caso.



Figura 2.44. Corredor industrial articulado junto al eje de la Nacional 634. Discurre también párelo al trazado de la autovía A-64, que impone su límite por el norte. Fuente: Google Maps

Según el tipo de actividad que albergue, diferenciamos entre polígonos copados por actividades de carácter propiamente industrial, como la industria transformadora; parques empresariales, que surgen de la sustitución de las actividades anteriores por otras terciarias, como las comerciales (Gobierno del Principado de Asturias 2016); parques tecnológicos, con una planificación urbana e integración paisajística más cuidada, que albergan empresas que trabajan en el campo de la investigación; y parques logísticos de distribución, en relación con actividades de tipo logístico, como el transporte de mercancías. Desde un punto de vista general, las dinámicas y formas de expansión de estos tipos de suelos industriales son similares, si bien cuentan con características diferentes, que peculiarizan cada caso.

Finalmente, caracterizamos los complejos portuario-industriales de Avilés y Gijón como otro tipo específico de suelo industrial que, no obstante, se superpone a las categorías anteriormente apuntadas. De este modo, estos complejos quedan compuestos tanto por suelos de grandes empresas industriales como por polígonos, siendo el puerto el factor atractor de toda la actividad económica y, por tanto, pauta clave en la explicación

de la localización de ésta. De ahí la especial consideración que hemos dado a esta tipología peculiar de suelo industrial.

Los puertos, fundamentalmente el de Gijón, objeto de una reciente expansión, mantienen un papel protagonista en la distribución del suelo industrial de Asturias, tal y como revela el plan de construcción de la Zona de Actividades Logísticas de Asturias (ZALIA), justificada como centro logístico apoyado en el aeropuerto de Asturias y los puertos de Avilés y Gijón (Fernández García et al. 2007).

Finalmente, todo el conjunto de pequeñas y medianas industrias aisladas, que no conforman parte de una concentración industrial, constituyen el último tipo de uso del suelo industrial que diferenciamos para el caso del ACA. Se trata de empresas de menor relevancia económica y cuya ubicación obedece a razones muy diversas. En consecuencia, resulta muy difícil llevar a cabo una caracterización general de este tipo de espacios industriales de acuerdo con sus dinámicas y posible evolución. No obstante, si cabe plantear su posible relación con la ausencia de suelo industrial planificado. Aunque este no parece el caso de Asturias, que aún cuenta con grandes bolsas de suelo industrial en proceso de ejecución y en venta.

2.3.7. LA EVOLUCIÓN RECIENTE DE LOS USOS Y COBERTURAS DEL SUELO

A continuación, llevamos a cabo una caracterización de los cambios recientes en los usos y coberturas del suelo en el ACA. Para ello, utilizamos como referencia las capas de cambio CORINE Land Cover (CLC), disponibles para el periodo 1990-2012. Se trata de la única fuente de usos y coberturas del suelo de detalle que nos permite llevar a cabo este análisis para un periodo anterior a 2005. En este sentido, análisis para periodos posteriores a 2005 no resultan suficientes para conseguir una adecuada comprensión de los cambios acontecidos en el área de estudio.

Debido a las características técnicas de CLC (5ha de superficie mínima cartografiable para el caso de la capa de cambios), solo podemos realizar a partir de esta fuente un análisis general del cambio de usos y coberturas del suelo para el periodo de análisis. De este modo, CLC no recoge los cambios inferiores a 5ha. Estos, sin embargo, son especialmente importantes para el caso de Asturias, debido a la fragmentación de su hábitat y, en general, de todos los usos y coberturas del suelo, determinada en buena parte por la complicada orografía del territorio regional.

Por tanto, si bien la caracterización general de la evolución reciente de los usos y coberturas del suelo en el ACA resulta de enorme utilidad para la comprensión de las dinámicas de cambio del ámbito de estudio, cabe tener en cuenta las incertidumbres asociadas a las conclusiones del análisis realizado. En relación con éstas, a las propias incertidumbres derivadas de la unidad mínima cartografiable de la fuente, cabe sumar los problemas de categorización e identificación de los cambios de CLC. Éstos muestran a veces cambios entre categorías erróneas e, incluso, cambios que no han sucedido en la realidad.

2.3.7.1. Los usos residenciales

Los tres mayores centros urbanos del Área Central (Avilés, Gijón y Oviedo), junto al nudo metropolitano (Llanera, Noreña y Siero), han sido los principales polos de desarrollo de los usos residenciales.

Entre todos ellos, destaca especialmente Oviedo, que sufre la mayor expansión urbana de todas las ciudades mencionadas. Crece en todas direcciones (Fig. 2.45). No obstante, en los últimos años el crecimiento se ha concentrado en los sentidos noreste y oeste, a partir de la expansión de los barrios de La Corredoria y La Florida (Fig. 2.46). De esta manera, al norte, el monte Naranco pone límite a la expansión urbana, mientras que hacia el sur la ciudad se topa con la autovía como límite de crecimiento.

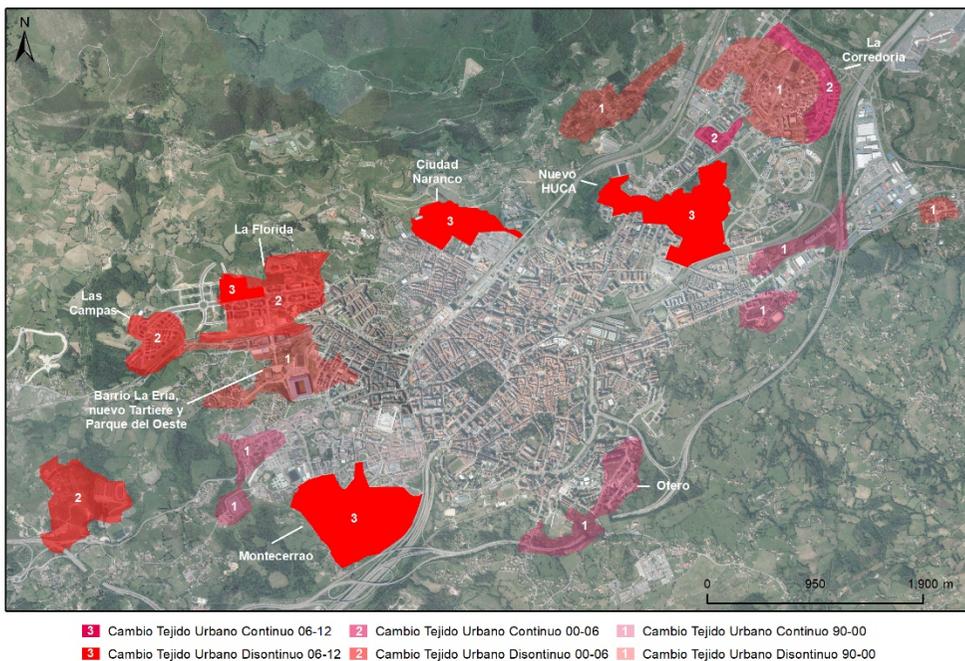


Figura 2.45. Cambios en las áreas residenciales de la ciudad de Oviedo para el periodo 1990-2012, de acuerdo con lo indicado por la capa de cambios de CORINE Land Cover. Fuentes: cambios CLC 1990-2000, 2000-2006, 2006-2012; PNOA Máxima Actualidad (IGN)

En general, estas líneas de expansión urbana son similares a las planteadas originariamente en los primeros planes de ordenación urbana para Oviedo, a mediados del siglo XX (Madera González 2016). De este modo, el desarrollo residencial de Oviedo queda muy marcado por lo establecido en los documentos de ordenación del suelo municipal, a los que cabe recurrir para entender la evolución de la ciudad.

Parte del crecimiento se ha realizado a partir de vivienda protegida, es decir, con algún tipo de ayuda pública (Moro Vallina 2007). Esto explica la elección de suelos a menudo distantes del centro de la ciudad, con pocos servicios e, incluso, de baja accesibilidad. Tal

es el caso de Las Campas (Fig. 2.47), edificada con anterioridad al conjunto de la Florida y, por tanto, sin dar continuidad urbana a la ciudad de Oviedo, de la que, sin embargo, forma parte. El precio del suelo jugó en tal promoción de vivienda un papel clave.

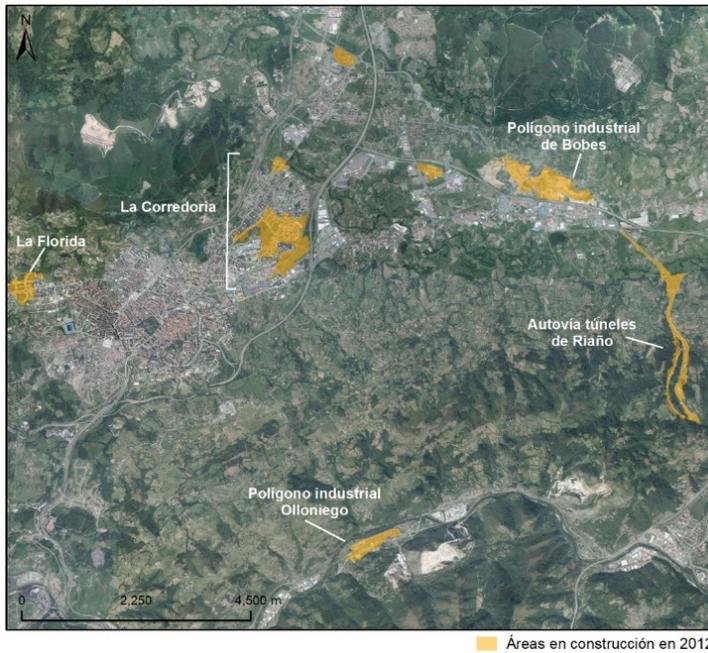


Figura 2.46. Áreas en construcción para el conjunto de la ciudad de Oviedo y el entorno metropolitano para el periodo 2006-2012, de acuerdo con lo indicado por la capa de cambios de CLC. Fuentes: cambios CLC 2006-2012; PNOA Máxima Actualidad (IGN)

Mientras los barrios mencionados, en los que se integra la vivienda protegida, se constituyen a partir de tipologías de edificación abierta en altura, en Oviedo también se han desarrollado suelos residenciales de vivienda unifamiliar. Se concentran éstos fundamentalmente en la parte occidental de la ciudad, en la que tradicionalmente se ha localizado la vivienda más acomodada (Tomé Fernández 1988), por sus mejores condiciones topográficas y distancia respecto a usos de rechazo, como los industriales. El barrio de Montecerrao es quizás el ejemplo más reciente y significativo de este tipo de tipología residencial.

Esta tipología, en lo general, tiende a desarrollarse en las márgenes de la ciudad, donde toma su contacto con el entorno rural circundante. En estos casos, como no hablamos ya de grandes promociones de vivienda, tales cambios no aparecen representados en el CORINE Land Cover. Sin embargo, pueden ser fácilmente identificados a través del empleo de fotografía aérea y de la cartografía catastral (Fig. 2.48).

Otra parte del crecimiento residencial de Oviedo se ha producido a partir de procesos de remodelación interna de la ciudad, especialmente en lo que respecta a aquellos crecimientos de finales del siglo XX (Calleja Puerta et al. 2015). La operación Cinturón Verde, destinada a reconvertir la mayor parte de los suelos ferroviarios de la ciudad (Madera González y Tomé Fernández 1996), es quizás el proceso más significativo a este respecto.



Figura 2.47. Barrio de las Campas, en Oviedo, visto desde La Florida. Se puede apreciar la ausencia de una conexión física entre el barrio y el resto de la ciudad, cuya trama compacta empieza en el lugar donde ha sido tomada la fotografía. Fuente: fotografía de autor

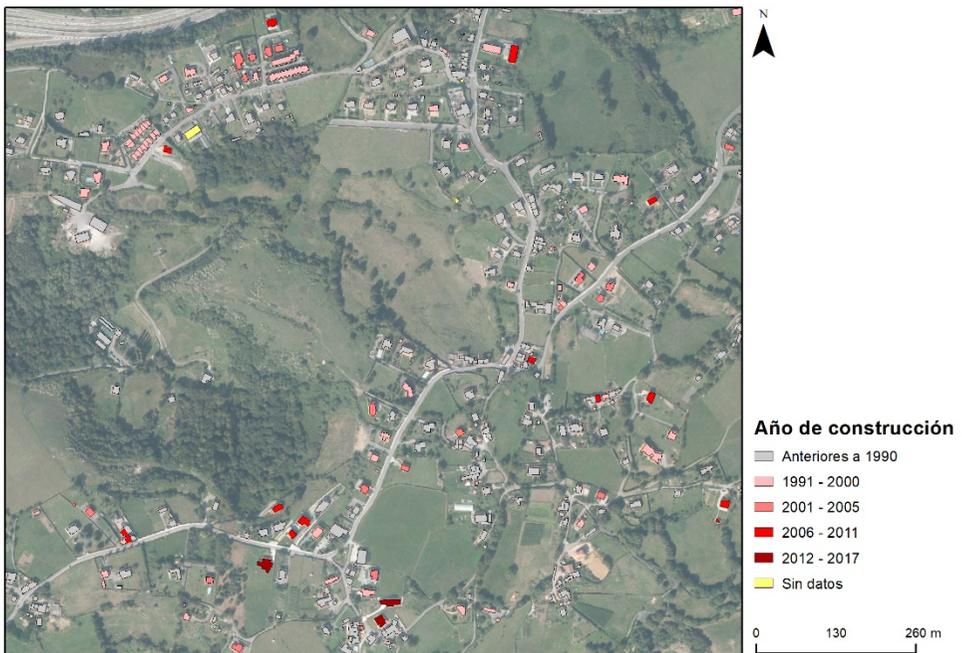


Figura 2.48. Año de construcción de las distintas edificaciones de vivienda unifamiliar en el entorno de La Manjosa (Oviedo). Fuentes: cartografía catastral (Sede Electrónica del Catastro); PNOA Máxima Actualidad (IGN)

Si bien se han producido notables desarrollos residenciales en Oviedo y su entorno más inmediato, el influjo y poder atractor de esta ciudad explica también parte de las dinámicas observadas en el nudo metropolitano (Fig. 2.49). En el concejo de Llanera se han edificado dos urbanizaciones residenciales *ex novo* (La Fresneda y Soto de Llanera), contando la urbanización de Soto de Llanera con servicios propios, como seguridad, un colegio o distintas instalaciones deportivas. Su ubicación se explica fundamentalmente a partir de la gran accesibilidad de los terrenos sobre los que se sitúan (Herrán Alonso 2002), de topografía llana y favorecidos por el único enlace que, hasta la creación del punto de

acceso en el Montico, absorbía el tráfico de la autopista “Y”, que conecta las ciudades de Avilés, Gijón y Oviedo.

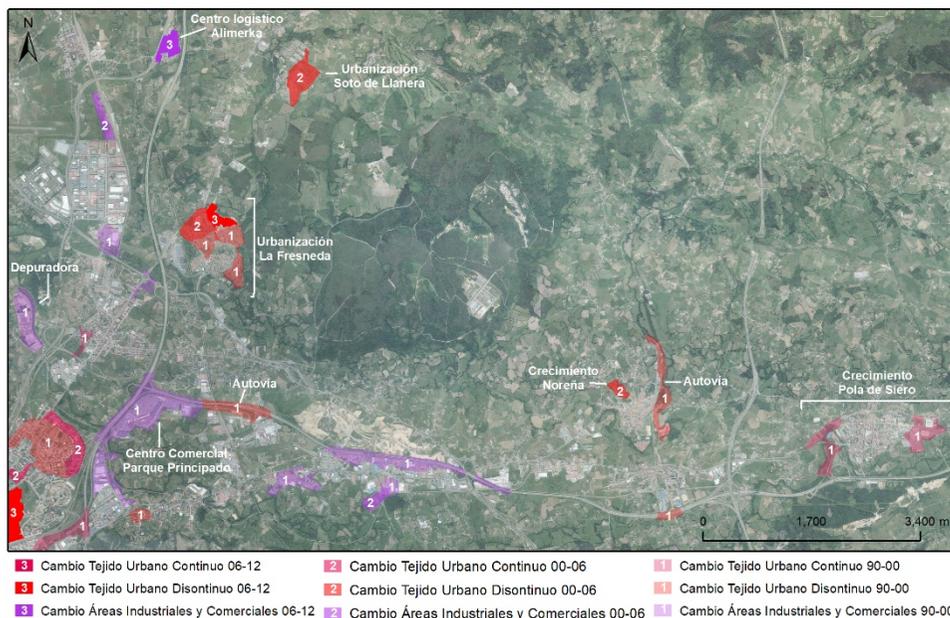


Figura 2.49. Cambios en las áreas residenciales e industriales en el denominado nudo metropolitano para el periodo 1990-2012, de acuerdo con lo indicado por la capa de cambios de CORINE Land Cover. Fuentes: cambios CLC 1990-2000, 2000-2006, 2006-2012; PNOA Máxima Actualidad (IGN)

Favorecidas también por su accesibilidad, posición central y el poder atractor de la capital del Principado, Noreña y Pola de Siero, a pesar de su reducido tamaño, han sufrido significativos procesos de expansión urbana, como puede constatarse en la Figura 2.49. De hecho, como ya se planteó con anterioridad, Noreña es el único concejo de todos los asturianos que mantiene una dinámica demográfica positiva, la cual se debe en parte a las propias características de este concejo, de muy reducidas dimensiones, prácticamente limitadas a su entorno urbano, en constante expansión.

En Gijón se ha seguido manteniendo la dicotomía entre una parte occidental industrial frente a una parte oriental residencial (Fig. 2.50). Es así en la parte este y central de la ciudad donde mayores han sido los desarrollos residenciales. La dirección de crecimiento ha sido siempre al sur, al quedar al norte restringida por la franja costera y al oeste por los usos industriales. Al este domina la vivienda unifamiliar y, en este sentido, no son comunes grandes promociones inmobiliarias que afecten a amplios espacios. De ahí que el CLC no nos permita ver el crecimiento de este ámbito, el cual, sin embargo, ha sido significativo.

El polígono residencial Nuevo Roces ha supuesto un hito en la conformación urbana de la ciudad, al rebasar el límite tradicionalmente impuesto por la autovía e, incluso, plantear una cierta convivencia con los usos industriales (Fig. 2.51). Constituye “el mayor

proyecto urbanístico ejecutado en Asturias en una sola fase” (Fernández Cuesta 2015). No obstante, este desarrollo urbano responde fundamentalmente a la iniciativa pública, a través de SOGEPSA (Sociedad Mixta de Gestión y Promoción del Suelo), conformada por agentes del sector público y privado.

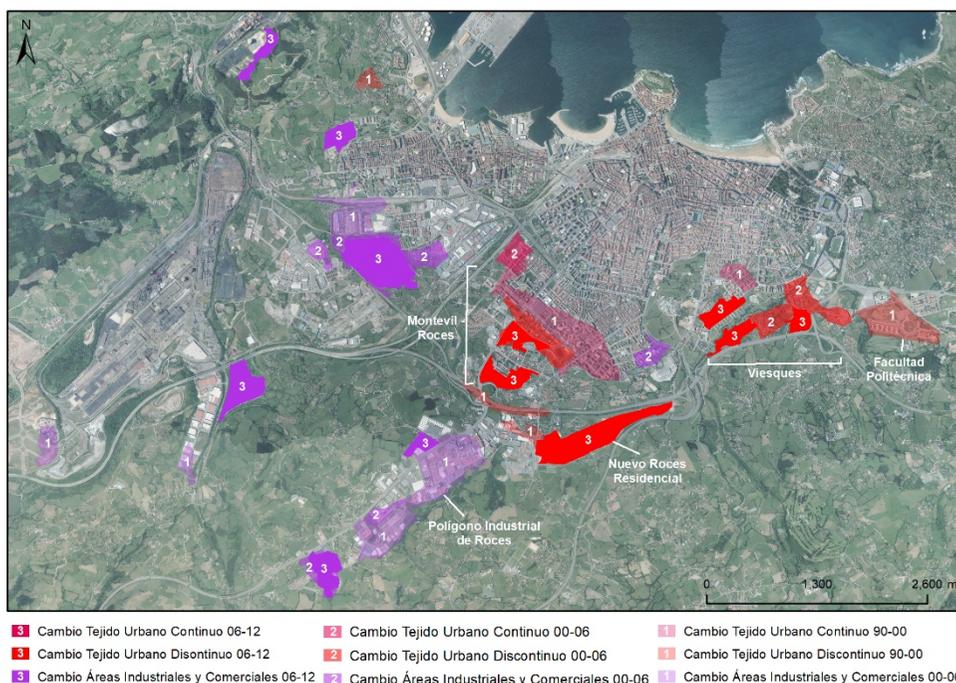


Figura 2.50. Cambios en las áreas residenciales e industriales en el concejo de Gijón para el periodo 1990-2012, de acuerdo con lo indicado por la capa de cambios de CORINE Land Cover. Fuentes: cambios CLC 1990-2000, 2000-2006, 2006-2012; PNOA Máxima Actualidad (IGN)

Nuevo Rocés se planteó como un nuevo desarrollo ante a falta de suelo urbanizable y la necesidad de vivienda, especialmente para las clases medias-bajas. En este sentido, incorpora a la oferta del suelo vivienda de iniciativa pública (Obeso Muñiz y Fernández García 2017). Se repite así el patrón apuntado para el caso de Oviedo, por el que los polígonos de vivienda promovidos desde la administración y con conjuntos de vivienda de iniciativa pública son trasladados a zonas desconectadas del conjunto urbano de la ciudad, en entornos de suelo barato. A este respecto, cabe diferenciar bien los factores que explican el desarrollo de los suelos residenciales de iniciativa privada de aquellos promovidos por el sector público y que, por tanto, incorporan a la oferta vivienda a un precio más asequible que el que se oferta en el mercado.



Figura 2.51. Imagen aérea de Gijón, con la urbanización Nuevo Rocés en primer plano. Como se puede apreciar, supone el salto del tejido urbano de la ciudad sobre la autovía del Cantábrico. Fuente: www.sogepsa.com

Las urbanizaciones de Montevil y Rocés, anteriores a la arriba apuntada, se caracterizan por un origen similar. De hecho, Montevil ha sido también promovida por SOGEPESA, con más de un 70% de viviendas de tipo protegido². Al contrario, los desarrollos residenciales al este de Gijón, de los que Viesques es el ejemplo más significativo, han sido fruto de la iniciativa privada, consecuencia del mayor atractivo residencial de esta área (Obeso Muñoz y Fernández García 2017). En todos los casos las tipologías edificatorias son de carácter abierto, con predominio de espacios verdes y suelo para servicios de distinto tipo. Se trata de una forma urbana similar a la de los nuevos barrios de Oviedo y que, en este sentido, viene a caracterizar los nuevos desarrollos residenciales en las ciudades asturianas.

El tercer eslabón en la jerarquía urbana de Asturias, Avilés, ha contado también con una importante expansión de su suelo residencial (Fig. 2.52), aunque no se haya traducido en un significativo crecimiento demográfico. Hablamos también aquí de tipologías de carácter abierto, aunque con una mayor importancia de la vivienda unifamiliar.

Avilés ha adoptado la dirección noroeste como principal eje de crecimiento, evitando así el contacto con los usos industriales y las barriadas obreras que definieron la morfología urbana de la ciudad en la segunda mitad del siglo XX. Se ha crecido hacia el interior,

² <http://www.sogepsa.com>

sobre los espacios rurales de mayor calidad ambiental, buscando el alejamiento del entorno de la ría, núcleo irradiador de la industrialización del siglo pasado. En la dirección de crecimiento apuntada, el terreno va ascendiendo en altura e incorporando más pendiente, lo que actúa en parte como límite del desarrollo urbano y explica el predominio de la vivienda unifamiliar para este ámbito.

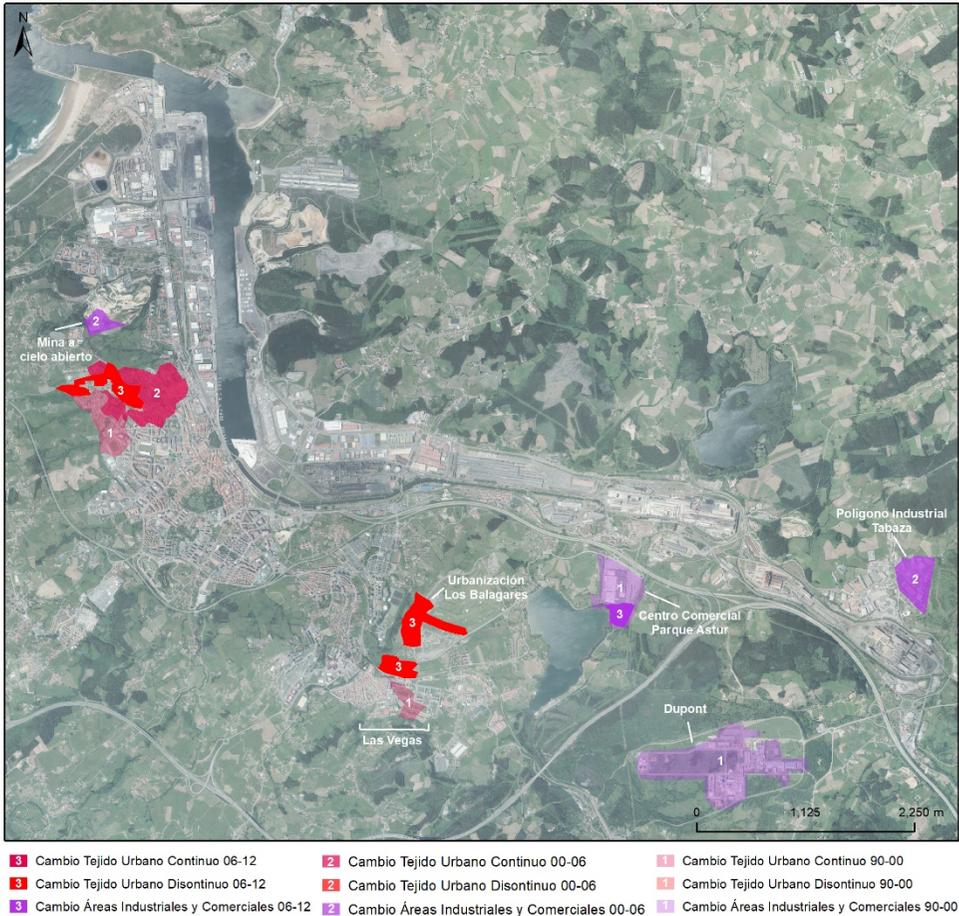


Figura 2.52. Cambios en las áreas residenciales e industriales en la comarca de Avilés para el periodo 1990-2012, de acuerdo con lo indicado por la capa de cambios de CORINE Land Cover. Fuentes: cambios CLC 1990-2000, 2000-2006, 2006-2012; PNOA Máxima Actualidad (IGN)

Recientemente se ha iniciado la urbanización de una gran bolsa de suelo urbanizable (La Magdalena Residencial), que define ya definitivamente parte del borde urbano de Avilés en contacto con la Nacional-632 (Fig. 2.53). Al igual que para los desarrollos residenciales de Oviedo y Gijón, hablamos también aquí de iniciativa pública, materializada a través de SOGEPSA, y con la inclusión de un importante conjunto de vivienda protegida (Fernández Soto 2013).



Figura 2.53. Ámbito de actuación y primera urbanización del conjunto “La Magdalena Residencial”. Fuente: tomado de Fernández Soto (2013)

En la comarca de Avilés se han producido también desarrollos residenciales de interés y que, en parte, entran en relación con el fenómeno metropolitano. En la franja costera del concejo de Castrillón los principales cambios se han realizado a partir de tipologías de vivienda unifamiliar (Fig. 2.54), cuyo estudio plantea similares problemas a los apuntados para Gijón y Oviedo. La unidad mínima cartografiada de CORINE Land Cover nos impide representar tales cambios de forma cartográfica.

Su localización se explica por la cercanía de la costa y, por tanto, por la importancia del fenómeno de la segunda residencia. No obstante, también cabe mencionar la mayor calidad ambiental del conjunto. De hecho, esto explica también que otro de los focos de crecimiento de suelo residencial en la comarca de Avilés se haya dado en la zona de Las Vegas y en las proximidades al embalse de Trasona.

Aquí se ha ubicado la urbanización de los Balagares (Fig. 2.24), de vivienda de alto poder adquisitivo, asociada a un campo de golf y en cuya localización parece haber jugado también un papel importante la accesibilidad proporcionada por el enlace de la “Y” a la altura del centro comercial Parque Astur (Fernández Soto 2013).

En las Cuencas Mineras el crecimiento del suelo residencial ha sido escaso (Fig. 2.56), consecuencia del declive demográfico y económico de estos ámbitos, pero también de la escasez de suelo sobre el que edificar. En este sentido, la mayor parte de los cambios acontecidos en estas zonas, bien son de escaso tamaño, o bien se han realizado a partir de procesos de reconversión industrial.

Entre los desarrollos residenciales más significados destacan Langreo Centro y Mayacina (Mieres), que se encuentran también poblados de vivienda protegida (Tomé Fernández 2010). Se pueden añadir a ellos la entrada a El Entrego, en los terrenos circundantes a la estación de Renfe. De nuevo, la vivienda protegida ha caracterizado la práctica totalidad de la promoción de vivienda realizada. Por tanto, las dinámicas de estos ámbitos quedan fundamentalmente explicadas por la iniciativa pública y, en relación con ellas, por decisiones de carácter político.

Por último, han surgido también nuevos suelos residenciales en todo el espacio rural del Área Central, así como el las villas de carácter intermedio. Entre éstas, destacan especialmente aquellas más próximas a la costa, en relación con el atractivo ejercido por ésta

y, vinculado al mismo, la difusión de la segunda residencia en estos ámbitos. Su estudio, de nuevo, por el escaso territorio al que afectan estos cambios, debe realizarse a partir de fuentes de detalle, como ortofotografía aérea o cartografía catastral.

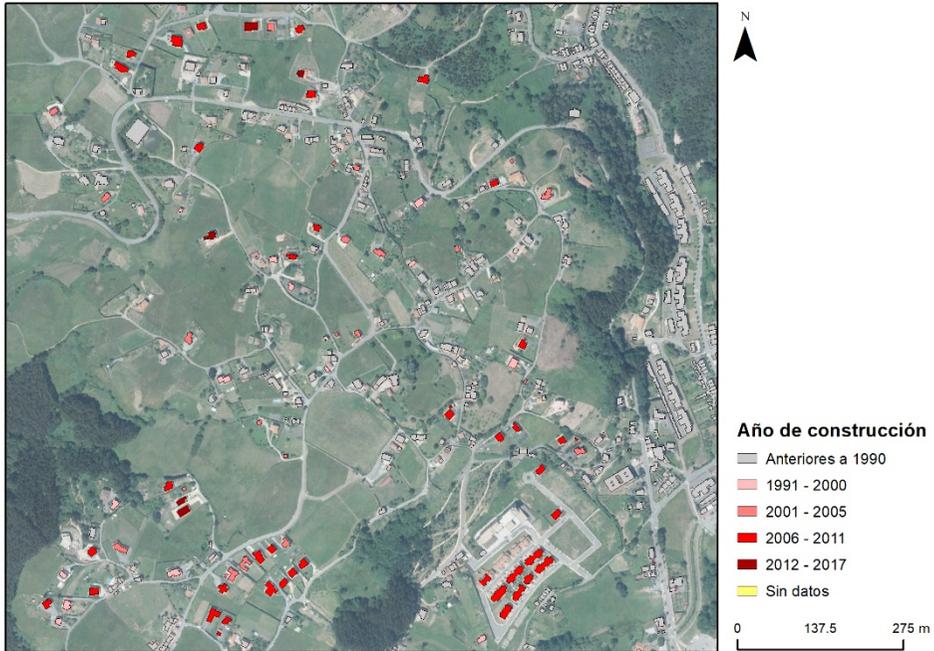


Figura 2.54. Año de construcción de las distintas edificaciones de vivienda unifamiliar en el entorno de Piedras Blancas (Castrillón). Fuentes: cartografía catastral (Sede Electrónica del Catastro); PNOA Máxima Actualidad (IGN)

2.3.7.2. Los usos industriales y comerciales

A) Los usos industriales

Con la excepción de la Dupont, la evolución de los usos industriales en el ACA en las últimas décadas ha estado fundamentalmente protagonizada por la creación de polígonos industriales u otro tipo de iniciativas similares, como los parques empresariales.

La Dupont es una gran empresa química, con un impacto territorial similar al de la gran industria pesada del siglo pasado: problemas de contaminación, gran consumo de suelo, etc. Por sus características, este tipo de cambio parece temporal en el tiempo y no es probable que pueda repetirse en el futuro. En este sentido, la empresa se encuentra vinculada a un conjunto de problemas medioambientales (Tomé Fernández 1999) y, además, en su instalación parece haber pesado una clara decisión política (Mora Bongera 2012).

En lo que respecta a los polígonos industriales y parques empresariales, su localización ha quedado en buena medida determinada por la accesibilidad proporcionada por las

principales vías de comunicación, así como por la aptitud topográfica del terreno, con preferencia hacia espacios de escasa pendiente (Fernández García et al. 2007). No obstante, la planificación y políticas públicas de promoción de suelo industrial también han jugado un papel clave (Gobierno del Principado de Asturias 2016). En este sentido, la práctica totalidad de los suelos industriales desarrollados en las últimas décadas y mostrados por la cartografía CORINE han sido promovidos por algún tipo de administración, ya sea regional, municipal o, incluso, nacional, a través de políticas de incentivos económicos (Benito del Pozo 2006).

En clara conexión con ese último punto se encuentra la promoción de suelo industrial en el conjunto de las Cuencas Mineras, receptoras de fondos procedentes de políticas de reactivación económica. Los fondos mineros explican en este sentido gran parte de los cambios recientes de los suelos industriales para los valles mineros, y la práctica totalidad de los mostrados por la cartografía de cambios de CORINE. Parte de esos usos industriales se ubican sobre espacios de anterior dedicación minera, reutilizados una vez se produce el cese de la misma (Tomé Fernández 2010).

Con relación a la topografía, el desarrollo de los usos industriales de las últimas décadas se ha concentrado en la rasa costera, para los casos de Avilés y Gijón; el surco prelitoral, donde se ubica el denominado nudo metropolitano; y, hacia el interior, sobre los espacios de fondo de valle, es decir, en terrenos de vega. Los polígonos de Olloniego (Fig. 2.56) y Argame suponen, en este sentido, la colmatación de parte de los pocos espacios de vega que permanecieron ajenos a la dinámica urbanizadora e industrializadora en el conjunto de los valles mineros.

Esos ámbitos son a su vez los de mayor accesibilidad. De esta manera, las infraestructuras de comunicación de alta velocidad se desarrollan también en Asturias sobre los ámbitos topográficamente más favorables. Es decir, la rasa costera, el surco prelitoral y los fondos de valle.

Esta conexión entre la accesibilidad proporcionada por las vías de comunicación y el desarrollo de suelo industrial es especialmente patente en el caso de los polígonos de Roces y Granda. Éstos se articulan en torno a carreteras nacionales o vías rápidas, cuyo trazado determina, por tanto, la forma de este suelo industrial. El Parque Empresarial de Bobes, cuya construcción se ha vinculado al desdoblamiento de la AS-17 (Fernández García et al. 2007), es también un ejemplo claro de tal asociación.

La variable accesibilidad queda también aplicada al poder de atracción ejercido por los principales puertos de la región y, entre estos, fundamentalmente por el del Musel. El puerto explica en parte la gran concentración de suelo industrial que se produce en la parte occidental de Gijón, que no ha dejado de crecer en las últimas décadas (Fig. 2.57). Se ha acentuado así en esta ciudad la polarización de usos iniciada en el siglo pasado (orientación industrial al oeste y preferencia residencial en el este).

A ella han contribuido la aparición del Centro de Transportes, el desarrollo del mencionado polígono industrial de Roces, la ampliación del polígono de Somonte, los polí-

gonos de Bankuni3n y la Juveria, la promoci3n del Parque Empresarial Lloreda y, finalmente, el desarrollo de la primera fase de la Zona de Actividades Logísticas de Asturias (ZALIA).

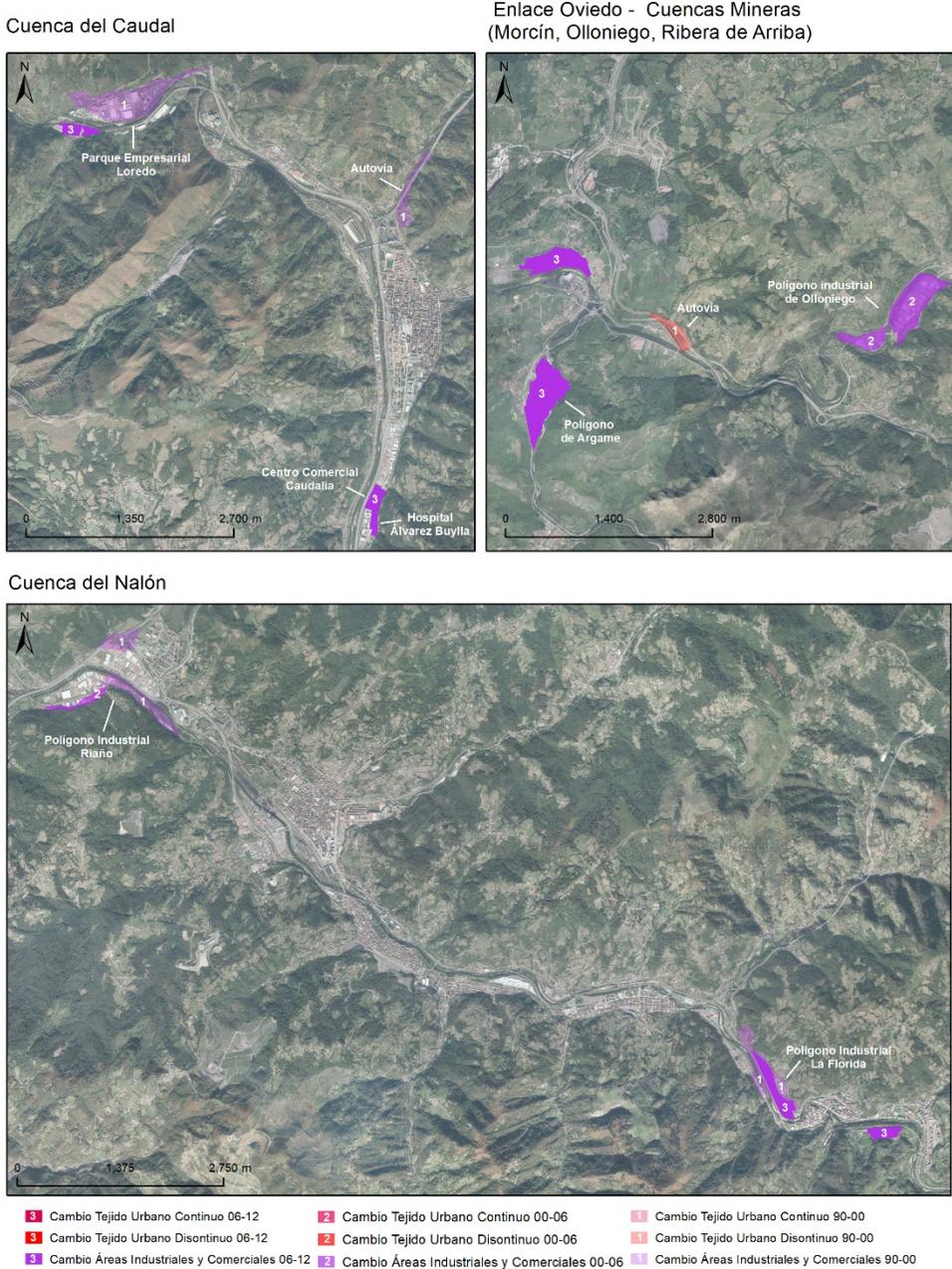


Figura 2.55. Cambios en las 3reas residenciales e industriales en las Cuencas M3neras para el periodo 1990-2012, de acuerdo con lo indicado por la capa de cambios de CORINE Land Cover. Fuentes: cambios CLC 1990-2000, 2000-2006, 2006-2012; PNOA M3xima Actualidad (IGN)



Figura 2.56. Polígono de Olloniego, localizado en el fondo de valle, aprovechando la bondad topográfica que ofrecen los terrenos de vega. Fuente: www.poligonosindustrialesasturias.com

La ZALIA, una gran bolsa de suelo industrial para actividades de tipo logístico, surge como una oportunidad de explotar la accesibilidad proporcionada por los puertos de Avilés y Gijón, el aeropuerto de Asturias y el ferrocarril, dando continuación al desarrollo de los suelos industriales en el oeste de Gijón. Su proyección, anterior al periodo de crisis económica, planteaba la creación de un gran conjunto de suelo industrial en el centro de Asturias, a realizar en cuatro fases distintas (Fernández Noguero 2013) y destinado a convertirse en el área logística líder en el noroeste de España (Fig. 2.58) (Mora Bongera 2012). A día de hoy, sólo se ha completado la urbanización de la primera fase, iniciada en 2010 (Fernández Noguero 2013), sin que haya existido ni una sola compra de las parcelas a la venta³.

La falta de buenas comunicaciones terrestres se ha planteado como una de las principales limitaciones en el desarrollo de la ZALIA (Ortega Montequín 2017). No obstante, la construcción de éstas aún se encuentra prevista en las futuras acciones a realizar por parte de las administraciones vinculadas al proyecto (Gobierno del Principado de Asturias 2016), lo que puede dar salida al definitivo despegue de este espacio industrial.

Sin embargo, en el escaso desarrollo del proyecto de la ZALIA también parece haber jugado un papel muy relevante la crisis económica iniciada en 2008. Esta explica también la situación de las grandes bolsas de suelo industrial del Área Central recientemente construidas, pero cuya venta aún no ha concluido. Se trata así de espacios urbanizados o en proceso de urbanización, pero en los que o bien se ha instalado un reducido número de empresas o, como en la ZALIA, aún no lo ha hecho ninguna.

Entre estos espacios destacan los parques empresariales de Bobes y Lloreda. Junto a la ZALIA, constituyen los espacios industriales disponibles de mayores dimensiones del Área Central. Para el primero aún no se ha concluido su urbanización, lo que impide el inicio de su ocupación (Maside 2013). Para el segundo, la falta de algunos servicios, de

³ “La ZALIA duplicó sus pérdidas en 2016 por la depreciación de sus terrenos”. Noticia del 2 de mayo de 2017. Fuente: <http://www.elcomercio.es>

carácter energético o en relación con las telecomunicaciones (fibra óptica), parece afectar a la venta del suelo disponible⁴.

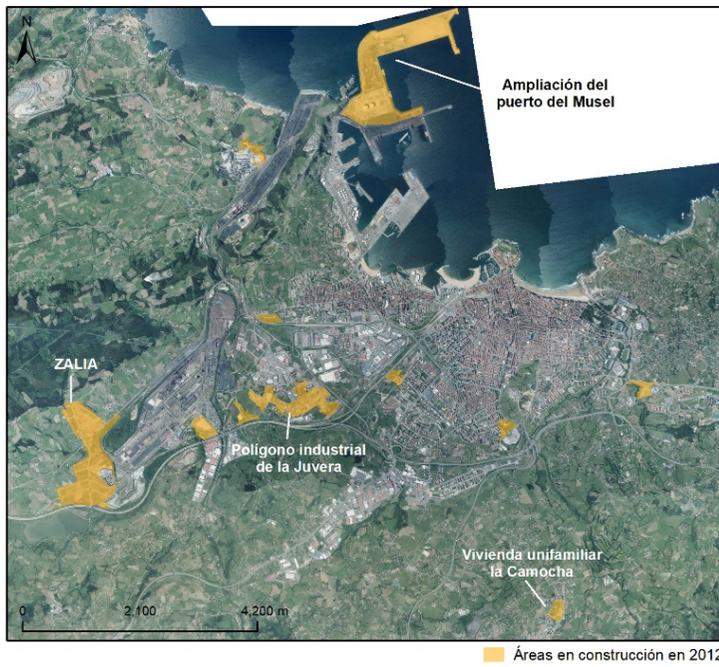


Figura 2.57. Áreas en construcción en el concejo de Gijón para el periodo 2006-2012, de acuerdo con lo indicado por la capa de cambios de CORINE Land Cover. Fuentes: cambios CLC 2006-2012; PNOA Máxima Actualidad (IGN)



Figura 2.58. A la derecha, recreación del proyecto de la Zona de Actividades Logísticas de Asturias (ZALIA). A la izquierda, terrenos afectados por la primera fase de urbanización de la ZALIA. Fuentes: Fernández Noguerol (2013) y www.zalia.es

De menores dimensiones, la segunda fase de ampliación del polígono de Olloniego (Olloniego II), el polígono de Reicastro en Mieres o el de La Moral en Langreo, son otros ejemplos de suelos industriales de desarrollo reciente, pero cuya ocupación es aún muy escasa consecuencia de los efectos de la crisis económica. No aparecen representados en la cartografía de cambios de CORINE, consecuencia de sus dimensiones más reducidas, así como por proceder de la reconversión de terrenos de anterior vinculación minera

⁴ “Solares del polígono industrial de Lloreda, revendidos a menos de 60 euros el metro”. Noticia del 19 de mayo de 2017. Fuente: <http://www.lne.es>

(Tomé Fernández 2010). De este modo, ya contaban con uso artificial, lo que complica la adecuada interpretación del cambio.

Con todo, existe actualmente en Asturias una gran bolsa de suelo industrial desocupada que cubre, sobradamente, la posible demanda de suelo industrial de los próximos años (Gobierno del Principado de Asturias 2016). Esta escasa demanda de suelo ha intentado paliarse a partir de una política general de reducción de los precios del suelo industrial, a fin de facilitar su venta⁵. Esta política, sin embargo, no parece haber proporcionado muchos frutos.

La promoción de suelo industrial por parte de entidades privadas es muy escasa. De lo mostrado por la cartografía CORINE Land Cover, tan sólo cabe mencionar el nuevo centro logístico de la cadena de supermercados Alimerka. Su posición, en Llanera y anejo a la AS-2 y la autopista “Y”, se explica fundamentalmente por la gran accesibilidad de estos terrenos.

B) Los usos comerciales

En el ACA, se han desarrollado en las últimas décadas un gran número de centros comerciales, lo que ha erigido a Asturias como la tercera Comunidad Autónoma en superficie de centros comerciales por habitante, posición que no se corresponde con el desarrollo demográfico y económico de esta región (Gobierno del Principado de Asturias 2016). Desde 2010 existen unas directrices específicas para la regulación de estos usos, que limitan los mismos (Gobierno del Principado de Asturias 2010). Esto hace improbable que se produzca la expansión de este uso en el futuro.

Diferenciamos entre dos tipos de centros comerciales: los intraurbanos y los periféricos (Benito del Pozo y López González 2004). Los primeros se encuentran localizados en el interior del tejido urbano de sus respectivas ciudades, que adoptan como principal nicho de mercado. Por ello, su tamaño es generalmente menor que el de los establecimientos periféricos, al promover su desarrollo en altura, derivado del mayor precio del suelo. Como consecuencia, estos usos aparecen a menudo confundidos en el CLC con los de carácter residencial, mientras que en otros casos no quedan ni siquiera representados por su escaso tamaño. No obstante, entre los identificados por esta cartografía sí podemos mencionar el caso del centro comercial Caudalia, en Mieres, inaugurado en 2006 (Fernández Soto 2013).

Los centros comerciales periféricos se orientan a un mercado comarcal e, incluso, regional. Suelen generar economías de escala comerciales a partir del agrupamiento de un gran número de establecimientos, dedicados a la comercialización de distintos tipos de productos. Generalmente, se caracterizan por un desarrollo horizontal, con amplios espacios de aparcamiento, lo que supone un gran consumo de suelo. En este sentido, se ubican en áreas periurbanas, de suelo barato (Benito del Pozo y López González 2004).

⁵ “El polígono de Lloreda abarata 20 parcelas un 35% para incentivar la compra de suelo”. Noticia del 28 de abril de 2013. Fuente: <http://www.lne.es>

En su localización, buscan también zonas de alta accesibilidad, a fin de facilitar la llegada de sus clientes potenciales (Fernández García 2003b). Los centros comerciales de Parque Astur e Intu Asturias (Fig. 2.59), anteriormente denominado Parque Principado, son los mejores ejemplos de este tipo de desarrollo comercial.



Figura 2.59. Imagen aérea de Intu Asturias, anteriormente Parque Principado. Constituye el mayor complejo comercial de Asturias. Se ubica en las proximidades de Oviedo y de la autovía A-64, lo que le garantiza una gran accesibilidad. Fuente: www.youtube.es

2.4. CONCLUSIONES

El estudio del Área Central de Asturias (ACA) y de sus dinámicas es una tarea compleja que, por tanto, lleva asociadas numerosas incertidumbres. En primer lugar, no existe un criterio único en la delimitación del ACA. Si bien desde el punto de vista funcional (movimientos pendulares de población y trabajo) se expande por la mayor parte del centro de Asturias, en términos de cambios territoriales solo los concejos centrales del ACA cuentan con unos cambios de usos y coberturas del suelo significativos.

Las Directrices de Ordenación del Territorio del Principado de Asturias de 1991 son, hoy por hoy, el único documento legal vigente que propone una ordenación del ACA y lleva a cabo su delimitación. Esta se ajusta bien a las dinámicas de cambios de usos y coberturas del suelo observadas en este análisis. Además, permite conectar directamente los ejercicios de modelización con la política de planificación. De esta forma, uno de los propósitos fundamentales de la modelización LUCC pasa por servir de herramienta práctica en los procesos de toma de decisiones.

Los cambios de usos y coberturas del suelo que se aprecian en Asturias afectan, a menudo, a espacios muy concretos y de escaso tamaño. Esto hace complicada su detección a través del empleo de fuentes cartográficas LULC. El paisaje asturiano es así uno muy fragmentado y de clara impronta rural, consecuencia de la orografía del territorio. Ejercicios de modelización como los propuestos en esta tesis, solo pueden aspirar a llevar a cabo una caracterización de los principales fenómenos de cambio en el territorio. De

esta forma, estos ejercicios muestran dificultades a la hora de comprender y simular cambios de detalle, como los que se aprecian en los espacios rurales cantábricos. Por tanto, la modelización del ACA y el estudio de su dinamismo a partir de la comparación de bases de datos LULC suponen un ejercicio de simplificación que, en la mayor parte de las ocasiones, oculta gran parte de los cambios territoriales de este ámbito.

Finalmente, la mayoría de los cambios de los usos y coberturas del suelo que se han dado en Asturias en las últimas décadas, y también en el ACA, quedan explicados por políticas públicas. Ya sean promocionadas por la administración estatal, autonómica o la local. Esto dificulta la repetición de patrones y procesos de cambio históricos en el futuro. De este modo, resulta complicado extraer una evolución orgánica del territorio analizado, en tanto el papel del mercado y los agentes socioeconómicos es secundario respecto al de los principales actores políticos.

A ello se añade la gran incidencia que ha tenido sobre el territorio asturiano la crisis económica iniciada en 2008. Se han ralentizado la práctica totalidad de las transformaciones territoriales que hasta entonces estaban en marcha. Además, el papel de la iniciativa pública en los cambios del ACA ha ido ganando aún más relevancia, ante la falta de estímulo económico para el resto de agentes territoriales. Con todo, para los dos principales tipos de usos (industrial y residencial), aún existen hoy en día en Asturias grandes bolsas de suelo libre que, si bien se encuentran urbanizadas o en proceso de urbanización, tienen capacidad para albergar la práctica totalidad de la demanda de crecimiento de los próximos años e, incluso, décadas. En consecuencia, la simulación de este paisaje a futuro, a partir del estudio de los cambios LULC del periodo anterior a la crisis, es una tarea compleja que, sin duda, acarrea numerosas incertidumbres. Sólo a través de un adecuado uso de la información experta, se puede crear una correcta narrativa de la evolución de este territorio que encaje con su situación actual.

Capítulo 3

Fuentes y métodos

3.1. INTRODUCCIÓN

Para realizar los distintos análisis que componen los bloques III y IV, así como para la descripción del área de estudio realizada en el Capítulo 2, se han empleado un conjunto de fuentes, métodos, técnicas y modelos del Cambio de Usos y Coberturas del Suelo (*Land Use Cover Change*, LUCC), de diferente naturaleza y singularidad.

Cada capítulo utiliza distintos datos y herramientas, de acuerdo con su propósito y finalidad, según lo indicado en la Figura 3.1. En las siguientes secciones, se detallan las características de las fuentes y herramientas empleadas. Al mismo tiempo, se proporciona información más detallada de las partes de esta investigación en las que han sido utilizadas.

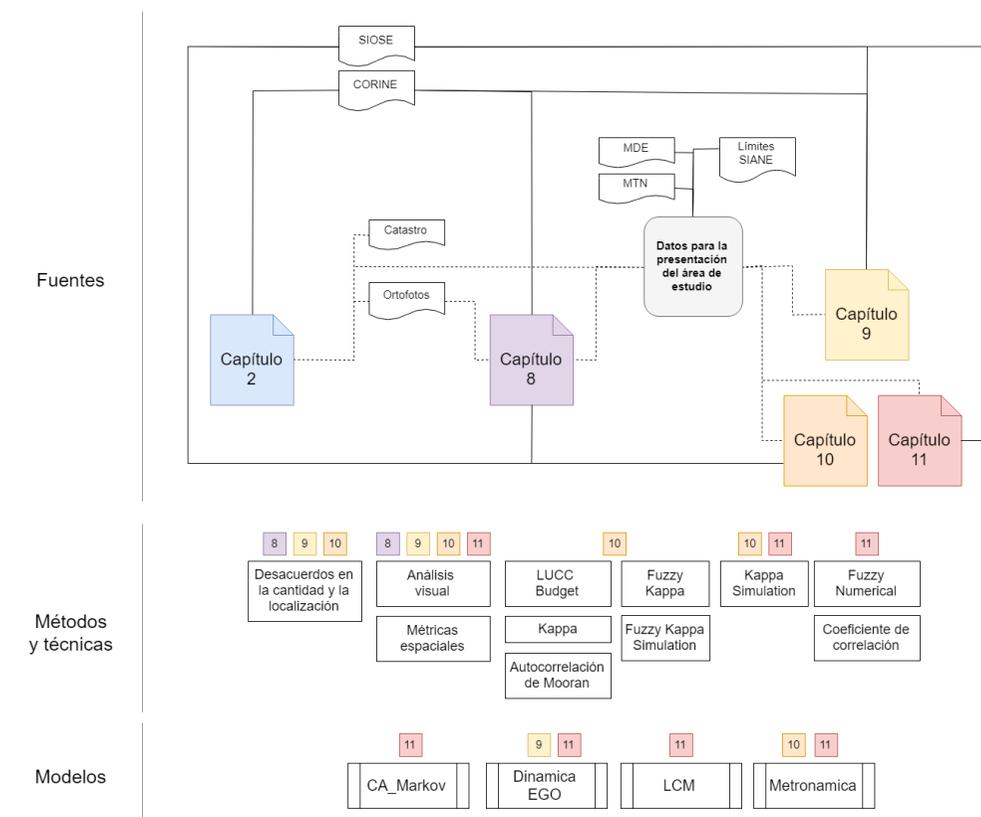


Figura 3.1. Relación de las diferentes fuentes, técnicas, métodos y modelos utilizados en la realización de esta investigación. Se detalla en cada caso el o los capítulos en los que se hace uso de los mismos

3.2. FUENTES

En el desarrollo de esta investigación, hemos utilizado dos tipos principales de fuentes. Por un lado, bases de datos espaciales de Usos y Coberturas del Suelo (*Land Use Land Cover*, LULC), empleadas como fundamento para el funcionamiento de los modelos LUCC seleccionados, así como para la interpretación de los cambios LULC. Junto a éstas, se han empleado un conjunto de datos cartográficos y estadísticos de diferente naturaleza. Estos se han usado con una doble finalidad: a fin de llevar a cabo la creación de los factores que explican el cambio LULC, así como para la creación de la cartografía mostrada a lo largo de esta tesis.

3.2.1. BASES DE DATOS DE USOS Y COBERTURAS DEL SUELO

Se han utilizado las bases de datos CORINE Land Cover (CLC) y SIOSE para llevar a cabo la producción de los mapas LULC. En el Capítulo 7 se detallan las razones de su selección, mientras que en los capítulos 7, 8 y 9 se hace una profusa descripción de sus características, así como de los tratamientos que se han realizado para obtener los mapas finalmente empleados en la tesis.

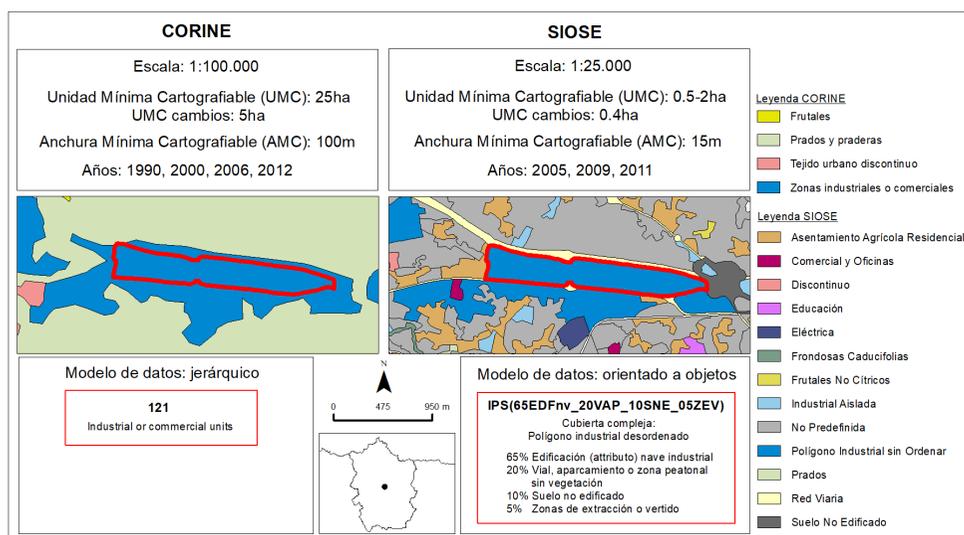


Figura 3.2. Comparación de las características técnicas de CORINE Land Cover y SIOSE. Se incluye un ejemplo de la diferente forma en la que cada una representa el mismo espacio. Fuentes: CLC 2006 v.2, SIOSE 2005

Estas fuentes se encuentran realizadas a distintas escalas y siguiendo un diferente modelo de datos (Fig. 3.2), lo que ha permitido analizar la influencia de los distintos componentes de la escala en un ejercicio de modelización LULC. De este modo, estas bases de datos han sido obtenidas a distintas escalas cartográficas y con una Unidad Mínima Cartografiada (UMC) diferente. A su vez, el SIOSE proporciona un gran detalle temático, lo que

permite jugar con su base de datos, de cara a obtener varios mapas con diferente resolución temática.

Para la caracterización de los cambios de los usos y coberturas del suelo del área de estudio, se han utilizado las capas de cambios CLC para los periodos 1990-2000, 2000-2006 y 2006-2012. Éstas dibujan aquellos cambios LULC localizados en el área analizada, con una superficie mínima cartografiada de 5ha. No obstante, la primera edición de la capa de cambios CLC (1990-2000) solo representa aquellos cambios mayores de 5ha que forman parte de polígonos de, al menos, 25ha (Büttner 2014).

3.2.2. OTRAS FUENTES EMPLEADAS

Para la conformación de los distintos ejercicios de modelización, así como para el estudio de las dinámicas territoriales del ámbito de estudio, se ha utilizado un conjunto de datos espaciales de diferentes características. De manera breve, quedan resumidos en la Tabla 3.1. Algunos de ellos se encuentran disponibles a distintas escalas y resoluciones, lo que ha permitido adaptar la fuente seleccionada a cada escala de análisis. De este modo, en el Capítulo 9, en el que se comparan dos ejercicios de modelización a distintas escalas cartográficas, se emplearon diferentes ediciones de estas fuentes, buscando siempre la escala más similar a aquella en la que cada modelo fue calibrado.

Tabla 3.1. Materiales auxiliares utilizados en la calibración y validación de los modelos LULC, así como en la realización de la cartografía de esta investigación

Datos	Escala / Resolución	Formato	Fechas	Fuente
Cartografía base SIANE	1:3.000.000 1:6.500.000 1:10.000.000 1:14.000.000 1:26.000.000	Vectorial	2015*	IGN
Cartografía catastral	1:500 – 1:1000	Vectorial	2018*	Catastro
GEODE - Cartografía geológica digital continua	1:50.000	Vectorial	2008	IGME
Líneas límite municipales	1:25.000	Vectorial	2015*	IGN
Mapa Topográfico Nacional	1:25.000 1:50.000 1:100.000	Vectorial	2015*	IGN
Mapa Urbanístico de Asturias	NA	KML / Shape	2015 / 2016*	SITPA-IDEAS
Modelo Digital de Elevaciones	5m 25m 200m	Ráster	2015*	IGN
Nomenclator Geográfico de Municipios y Entidades de Población	NA	Base de datos Access	2015*	IGN
Ortofotos PNOA	25cm	Ráster	2006 2009 2011 2014	IGN

*Bases de datos de actualización continua. Se proporciona la fecha de descarga

El Mapa Topográfico Nacional (MTN) se ha utilizado para obtener información sobre las superficies urbanas e industriales así como, especialmente, para extraer la red de infraestructuras del área de estudio, a partir de la cual considerar las variables de accesibilidad. El Modelo Digital de Elevaciones (MDE) ha permitido considerar las variables altitud y pendientes en los modelos. El Mapa Urbanístico de Asturias da información sobre el estado de la planificación en el área de estudio, distinguiendo entre los distintos tipos de suelos urbanizables y no urbanizables.

La Cartografía Geológica Digital Continua fue empleada en el Capítulo 9 para obtener información sobre la posible implantación o ampliación de las explotaciones mineras, en relación con el tipo de material aprovechado. El Nomenclátor Geográfico se utilizó, a su vez, para extraer un mapa de densidades de población para el área de estudio. Este se calculó a partir de la función densidad Kernel, implementada en ArcGis, con un radio de búsqueda de 2.5km. La cartografía catastral ha servido para identificar la diferente edificación del área de estudio a escala de detalle. Permite saber, con cierta precisión, su año de construcción.

Finalmente, las ortofotos del Plan Nacional de Ortofotografía Área (PNOA) se han empleado como datos de ayuda y comprobación de la información mostrada por las bases de datos LULC, de cara a entender las consecuencias reales sobre el territorio de algunos de los cambios LULC estudiados. Además, estas imágenes proporcionan una visión global e integrada del territorio, que permite entender de manera visual muchas de sus características y procesos.

De manera complementaria, se ha recopilado información sobre el área de estudio a partir de la realización de entrevistas semi-estructuradas a expertos. En ellas se solicitó a estos su opinión sobre la delimitación del Área Central de Asturias y los posibles criterios a utilizar en tal tarea. También se recopiló información sobre las principales dinámicas de cambio de los Usos y Coberturas del Suelo en el área de estudio, así como la relación de posibles factores que explican las mismas. Finalmente, se procuró conocer otras fuentes de información de especial relevancia para el conocimiento del área de estudio y sus cambios LULC, diferentes de las consultadas hasta ese momento.

En el Anexo 2 se recoge el guion base utilizado en las entrevistas realizadas. Entre los profesionales consultados, se encuentran geógrafos que ejercen como docentes en la universidad (Felipe Fernández García, Fermín Rodríguez Gutiérrez), geógrafos profesionales (Marta Herrán Alonso, Marcos Ortega Montequín), otros investigadores universitarios (Víctor González Marroquín), así como profesionales de la administración autonómica (Cristóbal Manuel Carrero de Roa).

3.3. MODELOS

Se han utilizado cuatro modelos del Cambio de Usos y Coberturas del Suelo (*Land Use Cover Change*, LUCC): CA_Markov, Dinamica EGO, Land Change Modeler y Metronámica (Fig. 3.3). Se trata de los cuatro modelos utilizados en el proyecto de investigación en el que se inscribe la tesis (SIGEOMOD_2020), así como cuatro de los software de

modelización más comúnmente empleados. En este sentido, el análisis de la incertidumbre de acuerdo a su uso permite maximizar la utilidad de los resultados de esta investigación, por cuanto da respuesta específica a las incertidumbres asociadas a algunas de las herramientas más comunes utilizadas en la modelización LUCC.

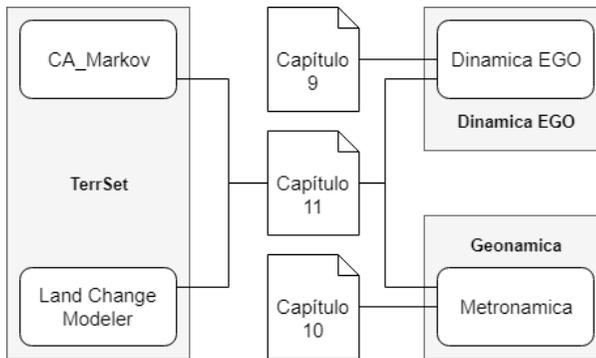


Figura 3.3. Modelos LUCC empleados en esta tesis doctoral. Se indica para cada uno de ellos el software en el que se encuentra integrado (en negrita), así como la relación de capítulos en los que se han utilizado

Información específica acerca de las características de cada modelo puede encontrarse en la Nota Técnica A, así como en el Capítulo 11. En este último se hace una comparación de los cuatro modelos seleccionados. El lector puede recurrir también a los manuales de cada modelo (Soares-Filho et al. 2009; RIKS 2012; Eastman 2015), así como a su correspondiente ayuda técnica. También a las breves presentaciones recogidas dentro del libro *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios* (Eastman y Toledano 2018a, b; Rodrigues y Soares-Filho 2018; Van Delden y Vanhout 2018).

3.4. MÉTODOS Y TÉCNICAS

Los métodos y técnicas empleados en esta tesis se han utilizado para dos tipos principales de análisis. En primer lugar, la calibración de los modelos LUCC. En segundo lugar, como herramienta para el estudio de las incertidumbres asociadas a la elección de la escala o del software utilizado en el ejercicio de modelización. En ambos casos, hemos empleado métodos similares, en tanto parte de los segundos conforman el cuerpo de técnicas de validación habitualmente empleadas para llevar a cabo la calibración y validación de modelos LUCC.

A continuación, se incluye una breve caracterización de todos estos métodos y técnicas, según su tipología. Para conocer sus especificidades y acceder a una descripción detallada de sus características, a excepción del análisis visual, consúltese la Nota Técnica B. Cada método se encuentra implementado en un programa o herramienta informática diferente. Hemos utilizado los siguientes: FRAGSTATS 4.0, Map Comparison Kit (MCK), Matriz de Pontius Jr. y TerrSet. En la Figura 3.4 se detalla el/los programa/s o herramienta/s informática/s en los que ha llevado a cabo el cálculo de los distintos métodos. Además, se indica en qué capítulos han sido empleados, especificando en este caso el tipo de análisis que ha hecho uso de los mismos.

Técnicas	Software	Capítulos			
		C8	C9	C10	C11
1 Análisis visual					
	Map Comparison Kit TerrSet	A	C / A	C / A	C
2 Índices de desacuerdo en las cantidades y la localización					
Desacuerdos en la cantidad y la localización	Matriz de Pontius	A	C / A	A	
LUCC Budget	Excel (Manual)			A	
Métricas espaciales	FRAGSTATS		C / A		
Kappa	Map Comparison Kit			C / A	C
Fuzzy Kappa	Map Comparison Kit			C / A	C
3 Índices sobre la configuración de los mapas					
Métricas espaciales	FRAGSTATS	A	C / A	C / A	C / A
Autocorrelación de Moran	TerrSet			A	
4 Índices de correlación entre mapas					
Coefficiente de correlación	TerrSet				A

Figura 3.4. Relación de métodos y técnicas empleados en la realización de esta tesis. Se especifica el software empleado para su cálculo, así como el tipo de análisis para el que han sido utilizados (C: calibración y validación de modelos LUCC; A: Análisis y comparación de resultados)

3.4.1. ANÁLISIS VISUAL

Es, quizás, el método más sencillo de los empleados, por cuanto no viene asociado a ningún cálculo de tipo estadístico. Sin embargo, se trata de un análisis de vital importancia y que, en este sentido, ha sido señalado como uno de los métodos más eficaces para la calibración y validación de un modelo LUCC (Van Vliet et al. 2011). De hecho, es un método comúnmente empleado para tal fin (White et al. 1997; Jayne Dablin 2014; Hewitt y Díaz-Pacheco 2017; Van Delden y Vanhout 2018).

El análisis visual de dos capas espaciales, como los resultados de un modelo, permite detectar rápidamente patrones relevantes, que un análisis estadístico puede obviar (Pontius Jr. et al. 2004). De este modo, este análisis incorpora el conocimiento experto del modelador, conocedor de la realidad simulada, lo que le permite realizar juicios de las diferencias entre cualquier conjunto de datos y la realidad. De hecho, este análisis permite hacer frente a las propias incertidumbres que contienen, en el caso de los ejercicios de validación, los datos utilizados como referencia. Sin embargo, resulta un análisis subjetivo, y de ahí sus limitaciones (Van Vliet et al. 2011; Bradley et al. 2016).

Varios autores señalan la complementariedad del análisis visual con los métodos estadísticos (Pontius Jr. et al. 2004; Paegelow et al. 2018), en tanto cada uno detecta errores o diferencias distintas que, en total, permiten al usuario alcanzar un mejor entendimiento de la forma en la que dos conjuntos de datos distintos representan un mismo ámbito de estudio.

entre tres o más categorías). Por su parte, el LUCB Budget permite distinguir, a nivel de categoría, entre ganancias y pérdidas brutas, cambio bruto y neto, y permuta².

Algunas de las métricas espaciales calculadas, como las referidas al área o a la proporción que cada categoría representa en el conjunto del área de estudio, aportan también información para caracterizar las cantidades en las que estas clases se encuentran presentes en cada mapa.

Finalmente, se han utilizado los distintos tipos de estadísticos Kappa (Kappa, Fuzzy Kappa, Kappa Simulation y Fuzzy Kappa Simulation), que proporcionan un índice global, para el conjunto del área analizada, sobre el acuerdo entre pares de mapas. El Kappa estándar compara el acuerdo entre dos mapas categóricos con el acuerdo esperado aleatoriamente. El Fuzzy Kappa corrige este último, incluyendo una función de pertenencia difusa, según la distancia o la categoría considerada. De este modo, valores idénticos al de la celda analizada, encontrados en su vecindad, son considerados acuerdos parciales. La confusión con categorías temáticamente similares, según los criterios del usuario, también puede considerarse como un acuerdo parcial. Los estadísticos Kappa y Fuzzy Kappa Simulation corrigen los anteriores, analizando únicamente el acuerdo de las diferencias de los dos mapas comparados respecto a un mapa inicial utilizado como referencia.

Por último, el estadístico Fuzzy Numerical evalúa la similitud de dos mapas de tipo continuo, no categórico, incorporando también una función de pertenencia difusa en función de la distancia. De este modo, nos da información acerca de cómo dos mapas de tipo continuo comparten los mismos valores en cada una de sus celdas, o en las vecinas de éstas.

3.4.3. ÍNDICES SOBRE LA CONFIGURACIÓN DE LOS MAPAS

La configuración se refiere a la forma en la que se encuentran distribuidos los distintos fragmentos o polígonos de cada una de las categorías que componen un mapa (Li y Reynolds 1993). En este sentido, hablamos habitualmente del patrón de los mapas.

Se estudia fundamentalmente a partir del empleo de las métricas espaciales, que permiten caracterizar, entre otros aspectos, la variabilidad de los fragmentos que componen un determinado mapa, su forma y las relaciones de vecindad y proximidad entre los mismos. En esta investigación se han seleccionado varias métricas de área, superficie, densidad y variabilidad, una métrica referida a la forma de los fragmentos y otro conjunto de métricas para analizar la distancia, vecindad y conectividad entre los fragmentos³. No obstante, debido a su elevada correlación, la mayor parte de estas últimas han sido utilizadas de manera exclusiva. Cuando empleada una en un capítulo, en la mayor parte de los casos, no se hizo uso del resto.

² Para conocer en detalle el significado y cálculo de todos estos componentes, tanto del LUCB Budget como de la matriz de Pontius Jr., diríjase a la Nota Técnica B.

³ Para acceder al listado de métricas espaciales utilizadas en esta investigación, así como una detallada descripción de las mismas, consúltese la Nota Técnica B.

A fin de evaluar en mayor profundidad la conectividad entre los fragmentos, hemos empleado también la autocorrelación de Moran's I, que indica el grado en el que los valores de una matriz ráster de encuentran agrupados y, por tanto, el nivel de agrupamiento de las clases que conforman un determinado mapa de tipo categórico.

3.4.4. ÍNDICES DE CORRELACIÓN ENTRE MAPAS

En algunos casos, más que evaluar las diferencias entre dos mapas referidos a la misma área de estudio, necesitamos considerar la correlación entre sus valores. Es un análisis especialmente útil para comparar mapas de distinta naturaleza, pero que representan fenómenos similares para el mismo ámbito de estudio. Con tal fin, hemos empleado el coeficiente de correlación, obtenido a partir de la realización de una regresión lineal simple entre cada par de mapas analizados.

II

Marco conceptual y metodológico

Capítulo 4

La modelización del cambio de usos y coberturas del suelo. Una introducción conceptual y metodológica

4.1. INTRODUCCIÓN

Previo al estudio de las fuentes de incertidumbre en la Modelización de los Cambios de Usos y Coberturas del Suelo (*Land Use Cover Change Modelling*, LUCCM), cabe aclarar algunos de los conceptos fundamentales vinculados a este tipo de análisis y que serán repetidamente empleados a lo largo de la redacción de esta tesis. De este modo, este capítulo tiene como objetivo ofrecer al lector una introducción conceptual al campo de la LUCCM, de tal manera que éste se encuentre familiarizado con sus términos y conceptos.

En las siguientes líneas se define qué es un modelo, un ejercicio de modelización y, más concretamente, un modelo del Cambio de Usos y Coberturas del Suelo (*Land Use Cover Change*, LUCC). A continuación, se detalla su utilidad y la forma en la que se construyen, haciendo especial énfasis en aquellas fases en las que se han centrado los análisis de incertidumbre realizados como parte de esta tesis. Finalmente, se realiza una revisión de diferentes propuestas para llevar a cabo la clasificación de los modelos LUCC, vinculando éstas a los modelos utilizados en la realización de esta investigación.

4.2. ¿QUÉ ES?

Un modelo supone una abstracción de un objeto, sistema o proceso real, la cual nos permite comprender éstos, de manera teórica, a través de la realización de diferentes análisis y experimentos (Clarke 2004). Es así una construcción mental que nos facilita la comprensión del comportamiento de esos objetos, sistemas o procesos (Toro Balbotín 2014). Wainwright y Mulligan (2013) señalan que, en los modelos, sólo aquellos componentes que son de interés para el problema de análisis son representados. Así, un modelo es una abstracción, pero también una simplificación de la realidad, la cual es realizada de acuerdo con los objetivos de nuestro estudio.

La modelización supone la manipulación de ese modelo, de tal forma que podemos experimentar con él para ganar conocimiento sobre el objeto, sistema o proceso real que representa (Toro Balbotín 2014). La modelización es así una forma de mejorar la comprensión de éstos, así como de generar hipótesis sobre los mismos (Wainwright y Mulligan 2013).

Existen numerosos tipos de modelos, algunos de los cuales describen en su libro Wainwright y Mulligan (2013). En nuestro caso, hablamos de modelos de simulación

espacialmente explícitos. Un modelo de simulación es aquel cuyo funcionamiento queda determinado por el cálculo, para cada momento temporal considerado, de las condiciones del objeto, sistema o proceso real representado, según las relaciones que describan los mismos y determinen su cambio (Wainwright y Mulligan 2013). Son espacialmente explícitos por cuanto se lleva a cabo la representación espacial de los distintos elementos y relaciones que componen el objeto, sistema o proceso analizado (Wainwright y Mulligan 2013).

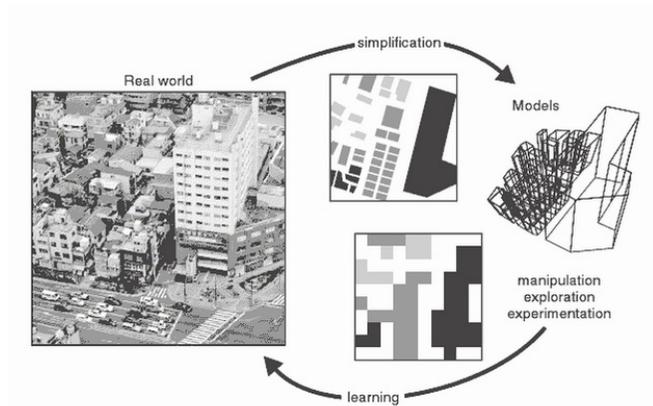


Figura 4.1. Representación gráfica de los conceptos de modelo y modelización. Fuente: tomado de O’Sullivan y Perry (2013)

En el caso de la LUCCM, hablamos de modelos de simulación especialmente explícitos cuyo fin pasa por comprender los cambios de los usos y coberturas del suelo de la superficie terrestre. Paegelow y Camacho Olmedo (2008) los enmarcan en el conjunto de la modelización de dinámicas ambientales, que definen como “la simulación del comportamiento de un sistema medioambiental en el espacio y a través del tiempo”. Por su parte, desde el National Research Council (2014) hablan, en general, de modelos del cambio terrestre (*Land Change Models, LCMs*), que incluyen cambios en los usos y cubiertas del suelo, así como las funciones medioambientales vinculadas a los procesos de carácter antrópico. En este sentido, Paegelow et al. (2013) definen la modelización del cambio terrestre como “la simulación del comportamiento de un sistema medioambiental y social en el espacio y a través del tiempo, en una manera que se relaciona con el cambio terrestre”.

Los usos del suelo definen el aprovechamiento socioeconómico de la tierra o su dimensión funcional, mientras que las cubiertas del suelo definen las coberturas de la superficie terrestre, caracterizadas según sus propiedades físicas o químicas (Valcárcel Sanz y Castaño Fernández 2012). En este sentido, son a menudo referidas como las coberturas del suelo (Aguilera Benavente 2008; Pérez-Hoyos y García-Haro 2009).

Vista la tierra desde el espacio aéreo o exterior, resulta muy difícil discernir el uso del suelo (Campbell y Wynne 2011). A través de técnicas de teledetección, ya sea aérea o espacial, lo habitual es así detectar coberturas y, en el caso de contar con información auxiliar, usos del suelo. De este modo, mapas sobre la ocupación del suelo no hacen una

clara distinción entre ambos conceptos. En consecuencia, realizamos una modelización del cambio de los usos y coberturas del suelo, en tanto ambos aspectos suelen quedar representados indistintamente en los datos utilizados como base para los ejercicios de modelización.

4.3. ¿PARA QUÉ SE UTILIZA?

Los modelos, también los modelos LUCC, se emplean con un buen número de propósitos, si bien todos ellos se relacionan con una mejor comprensión de la realidad modelada, ya sea por meras razones de incrementar el conocimiento sobre la misma; debido a la necesidad de testar su evolución bajo diferentes hipótesis; o bien como herramienta para la realización de otros estudios o análisis. En general, distinguimos entre aquellos ejercicios de modelización que tienen como fin una mejora del conocimiento del objeto de estudio y, por tanto, quedan fundamentalmente adscritos al campo académico, y aquellos que tienen un fin práctico, como ayuda en el proceso de toma de decisiones (Paegelow y Camacho Olmedo 2008).

El ejercicio de modelización como herramienta para la mejor comprensión del objeto de análisis es uno de los propósitos más comunes en el uso de los modelos. Se trata de modelizar para comprender el fenómeno analizado y, en el caso de los modelos de simulación, su evolución (Paegelow y Camacho Olmedo 2008). Es lo que O'Sullivan y Perry (2013) han denominado la utilización de los modelos como herramientas con las que pensar en el problema de análisis. Especialmente útiles por cuanto nos permiten comprender y desenredar los complejos sistemas reales que, incluso pese a la existencia de numerosos datos empíricos, como las imágenes de satélite, son difíciles de entender. En este sentido, no llegamos a tener una idea clara de qué nos dicen, sobre el objeto de análisis, esos datos (O'Sullivan y Perry 2013).

Como parte de ese uso de los modelos como medio para alcanzar una mejor comprensión del objeto de estudio, en ocasiones los ejercicios de modelización pueden ser de utilidad para orientar el trabajo de colección de los datos. De esta manera, un ejercicio de modelización puede ayudarnos a entender qué elementos de los que componen el objeto de estudio son más significativos para la comprensión de su comportamiento y, por ende, cuáles son los ámbitos en los que debemos de mejorar la colección de la información (O'Sullivan y Perry 2013).

Junto al conocimiento del objeto de estudio, el otro gran propósito de los ejercicios de modelización es lo que Paegelow y Camacho Olmedo (2008) definen como el "objetivo operacional". Se trata de simular el objeto, sistema o proceso de análisis a futuro, de tal manera que conseguimos imágenes plausibles de cómo el objeto estudiado se puede presentar en otro momento temporal.

Este tipo de propósito se vincula habitualmente con el uso de los modelos para realizar predicciones (Paegelow y Camacho Olmedo 2008; Perry 2009; O'Sullivan y Perry 2013), lo que implica una serie de dificultades, debido a la incertidumbre que la propia

modelización supone. Superando estas limitaciones, los modelos son habitualmente empleados, especialmente en LUCCM, en un sentido exploratorio (Perry 2009). Es decir, modelizar para comprobar como un objeto de estudio se puede comportar bajo diferentes circunstancias en otro momento temporal. Esto resulta de enorme utilidad para el proceso de toma de decisiones y, por tanto, en el campo de ordenación y la planificación (Elsawah et al. 2017).

En esos casos, los modelos se utilizan para generar escenarios. Entendemos por escenario una descripción plausible de cómo puede desarrollarse en el futuro un sistema u objeto de estudio, así como las variables que explican su cambio (Walker et al. 2003). No obstante, este término no cuenta con una única definición comúnmente aceptada. Escobar et al. (2018) proporcionan una introducción a este debate conceptual.

En relación con la utilización de los modelos en un sentido exploratorio, Perry (2009) plantea también el empleo de la modelización, en el campo de la planificación y toma de decisiones, como herramienta que ayude a reducir las distancias entre la comunidad académica y los agentes sociales, de tal manera que se consiga una mayor integración de ambos en el proceso de toma de decisiones. Habla así Perry (2009) de los modelos como herramientas de integración.

4.4. ¿QUÉ DATOS SE NECESITAN?

En función del enfoque elegido para llevar a cabo el ejercicio de modelización, los datos requeridos por el modelo pueden variar notablemente. Recogemos aquí aquellos que han sido necesarios para la implementación de los modelos empleados en esta tesis, que sigue un enfoque específico, tal y como se explica en las siguientes secciones. En general, para cualquier modelo LUCC, diferenciamos dos tipos de datos fundamentales: los que hacen referencia a la variable modelada y los que explican el cambio de ésta.

Para el primer caso empleamos las bases de datos de Usos y Coberturas del Suelo (*Land Use Land Cover, LULC*). Se trata de datos que, ya sean vectoriales o ráster, muestran, para una escala específica y, por tanto, con un determinado nivel de detalle, los usos y coberturas del suelo que definen el área de estudio elegida. Puede tratarse de cartografías de usos del suelo o de cartografías de coberturas del suelo, entendidos como conceptos independientes. Sin embargo, en la mayor parte de las ocasiones, y como consecuencia de las limitaciones impuestas por las técnicas de obtención de las mismas, estas cartografías suelen incluir usos y coberturas indistintamente.

Suelen obtenerse a partir de técnicas de teledetección, aérea o espacial. No obstante, también se producen a partir de otras fuentes o métodos, como censos, información catastral, métodos de participación o trabajo de campo (Tabla 1). Verburg et al. (2011) hacen un repaso de los principales problemas y desafíos relacionados con la utilización de este tipo de datos.

Los datos utilizados para el caso de las variables independientes que explican el cambio de los usos y coberturas del suelo son muy heterogéneos, en función de la variable

Tabla 4.1. Relación de distintos tipos de fuentes normalmente utilizadas para la producción de cartografía LULC. Fuente: basado en Verburg et al. (2011)

Fuentes	Resolución espacial	Extensión espacial	Resolución temporal	Extensión temporal	Propiedades temáticas
Teledetección (imágenes aéreas o de satélite)	Según el sensor empleado (la mayor parte entre 0.6m y 1km)	Según el sensor empleado (en el caso de las imágenes de satélite, dependiente de la presencia de nubes)	Según el sensor empleado (entre varios días para las imágenes de satélite, y varios años, para las imágenes aéreas)	Según el sensor empleado (las imágenes aéreas se remontan hasta la década de los 50, mientras las imágenes de satélite se encuentran disponibles a partir de los 70, si bien procedentes de sensores con una baja resolución espacial)	Categorías de usos y/o coberturas del suelo
Censos / Información estadística	Límites administrativos	A menudo escala nacional	Periodo censal (a menudo cada 5 o 10 años)	Según el país y su sistema estadístico	Se centra en los sectores económicos (fundamentalmente agricultura y silvicultura)
Trabajo de campo	Según escala de mapeo (normalmente entre 1:25.000 y 1:1.000.000)	Variable	Normalmente realizados para una única fecha	-	Variable según el propósito
Métodos de participación	Según escala de mapeo	A menudo restringido al territorio de una o varias comunidades	Una única fecha	-	Variable según el propósito
Información catastral	Información precisa al nivel de cada propiedad	Según la información catastral, aunque normalmente a escala nacional o estatal	Actualización continua	Según el país y el inicio de su cartografía catastral	Se centra en información sobre la propiedad

seleccionada. Gallardo Beltrán (2014) realiza una breve revisión de las principales variables explicativas del cambio utilizadas en la LUCCM. Brandt et al. (1999) distinguen entre cinco grandes tipos de variables explicativas del cambio (*driving forces*): socioeconómicas, tecnológicas, naturales y culturales. Por su parte, Mustafa et al. (2014) diferencian entre cuatro grupos para el caso de los modelos de Autómatas Celulares (CA): variables socioeconómicas, geofísicas, de planificación política y de accesibilidad.

Entre las variables tecnológicas podemos mencionar las relacionadas con la accesibilidad, creadas a partir de mapas de infraestructuras que incluyen la relación de carreteras, líneas y estaciones de ferrocarril, etc. Por otro lado, como ejemplo típico de variable natural o geofísica, se encuentran las condiciones topográficas del terreno, usualmente obtenidas a partir de Modelos Digitales de Elevaciones (MDE).

4.5. ¿EN QUÉ CONSISTE?

La primera etapa de cualquier ejercicio de modelización pasa por la elección del objeto de estudio y su conceptualización. Una vez ese modelo es conceptualizado, se produce su traslación a un modelo matemático, implementado a través de un software informático (Fig. 4.2). Naturalmente, estas etapas cuentan con sus propios procesos de validación y verificación, de tal manera que se asegura que el objeto de estudio ha sido correctamente conceptualizado y que tal conceptualización se ha traducido de forma apropiada en un modelo cuantitativo. En este sentido, se define la verificación de un modelo como el proceso de comprobación del ajuste entre el modelo implementado y su diseño (North y Macal 2007), si bien Rykiel (1996) habla en este sentido de validación conceptual.

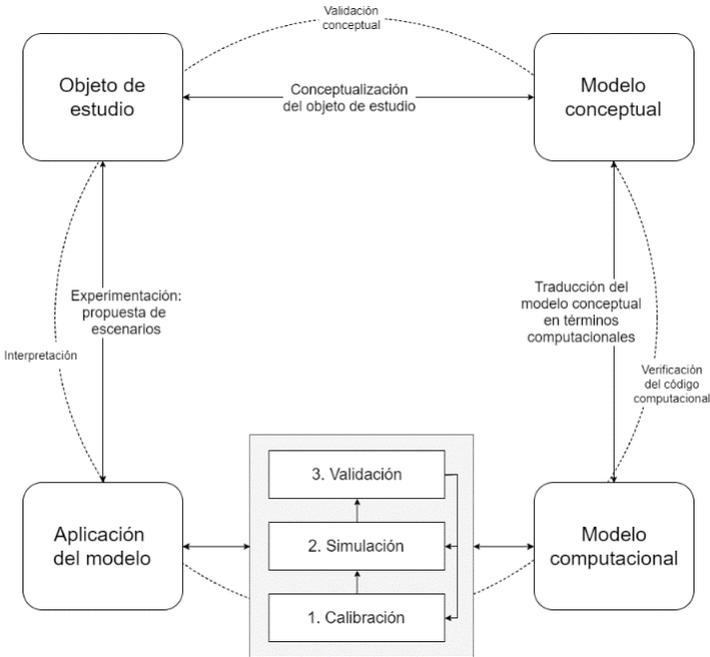


Figura 4.2. Conceptualización del ciclo de trabajo de un ejercicio de modelización. En gris, las etapas en las que se centran la mayor parte de los análisis realizados en esta tesis. Fuente: basado en Magliocca et al. (2015) y Van Vliet et al. (2016)

El modelo computacional seleccionado puede ser desarrollado específicamente para nuestro estudio, o bien ser un modelo estándar, ya desarrollado por algún organismo o empresa, y adaptable a un gran rango de situaciones. El primer enfoque nos permite diseñar el modelo de acuerdo con las características y especificidades del elemento de estudio, lo que ha de suponer una mejor adaptación de la herramienta utilizada al objeto de análisis. Sin embargo, los modelos estándar son herramientas más estables, testadas por numerosos usuarios y de los que, además, se suele poseer más conocimiento sobre sus ventajas y, especialmente, sobre sus limitaciones.

Una vez contamos con el modelo, se inicia propiamente el ejercicio de modelización. Es en esta fase del ciclo de trabajo de un ejercicio de modelización en la que se centran la mayor parte de los análisis realizados en esta tesis. De ahí la especial atención que aquí dedicaremos a esta fase, que se encuentra compuesta por varias etapas.

Siguiendo el marco teórico propuesto por Camacho Olmedo et al. (2018b), distinguimos en esta fase cuatro momentos fundamentales: calibración, simulación, validación y propuesta de escenarios. Los tres primeros se encuentran muy relacionados entre sí, solapándose en la mayor parte de las ocasiones, lo que los hace difíciles de distinguir (Camacho Olmedo et al. 2018c). La calibración es el proceso de parametrización del modelo, comprobando como este se ajusta a la realidad observada. La simulación hace referencia a la propia modelización en sí, es decir, al funcionamiento del modelo elegido, de tal forma que todos los parámetros decididos durante la calibración son combinados para dar lugar a un resultado final. La evaluación de este resultado con datos independientes es lo que conocemos como validación. La detección de errores o imprecisiones en esta fase supone la vuelta a la etapa de calibración, conformando así las tres etapas anteriores un bucle, que solo se concluye cuando la validación genera un resultado óptimo (Fig. 4.2). Finalmente, la propuesta de escenarios se produce, una vez el modelo se encuentra calibrado y validado, variando algunos parámetros o datos del modelo para testar la influencia que diferentes hipótesis de evolución futura pueden tener en el objeto de estudio; es decir, a través de la experimentación con la aplicación creada.

Varios estudios han propuesto guías y marcos teóricos más elaborados sobre las etapas de creación de un ejercicio de modelización, en los que se explican cada una de estas fases y las decisiones que cabe tomar en ellas. Jakeman et al. (2006) diferencian diez etapas en el desarrollo y evaluación de modelos medioambientales, describiendo en detalle cada una de ellas, en relación con las decisiones que cabe tomar o los problemas que pueden surgir en cada caso. Van Delden et al. (2011) proponen una guía metodológica para la creación de modelos integrados, con un claro enfoque en su aplicabilidad práctica, de cara al proceso de toma de decisiones. Para ello, distingue 8 etapas fundamentales en el diseño y desarrollo de estos modelos. A continuación, describimos en detalle las tres etapas del ciclo de modelización en las que se centran la mayor parte de los análisis de esta tesis.

4.5.1. LA CALIBRACIÓN

La etapa de calibración puede definirse, en términos generales, como el proceso de parametrización del modelo empleado, de tal manera que los parámetros introducidos por el usuario se ajustan a la realidad observada, la cual normalmente se corresponde con un mapa LULC tomado como referencia. La validación, a diferencia de la calibración, utiliza como dato de referencia un mapa independiente, no empleado durante el proceso de calibración (Van Vliet et al. 2011).

Clarke (2018) considera la calibración como la fase más crítica en el proceso de diseño y aplicación de un modelo, tratándose así de una tarea obligatoria esencial en cualquier ejercicio de modelización (Clarke 2004).

Existen numerosos enfoques para llevar a cabo la calibración de modelos LUCC. Paegelow y Camacho Olmedo (2005) distinguen entre enfoques automáticos y supervisados, según el papel del usuario en el ejercicio de calibración. No obstante, plantean que lo habitual es el uso mixto de ambos enfoques. Mas et al. (2018) dividen los enfoques para calibrar modelos LUCC en dos amplios grupos: aquellas calibraciones que se basan en datos y la información que estos proporcionan sobre el objeto de estudio, y las calibraciones basadas en conocimiento experto. Clarke (2018), tomando sólo como referencia el primer tipo, es decir, la calibración basada en datos, divide ésta en tres grupos: la calibración basada en inspección visual y estadísticos, que compara los resultados del modelo con la realidad observada; el ajuste manual del modelo, a través de su aplicación reiterada, comprobando su evolución consecuencia de los cambios introducidos en los parámetros; y la calibración automática, que sigue el mismo principio que la última pero, en este caso, en vez de ser el usuario el que realiza la repetición de la modelización, es una máquina quien se encarga de esta tarea, concluyendo la calibración una vez se alcanzan los objetivos definidos para el método automático empleado.

Van Vliet et al. (2016), en una unión de los dos enfoques anteriores, diferencia cuatro tipos de calibración: la basada en conocimiento experto; la calibración manual por parte de un usuario, en la que éste modifica los parámetros del modelo según diferentes criterios, ya sea inspección visual de la comparación del resultado simulado con la realidad observada, estadísticos proporcionando similar información, etc; la calibración automática, que es similar a la apuntada por Clarke (2018), en la que un modelo es corrido reiterativamente de acuerdo con un método computacional que ajusta los parámetros del modelo hasta que se cumple una función objetivo predefinida; y la calibración según métodos estadísticos, que intentan encontrar una relación estadística entre las variables independientes (factores explicativos) y variables dependientes (cambio de los usos y coberturas del suelo) del modelo.

Muchos son los parámetros y elementos del modelo que se calibran durante esta etapa del ejercicio de modelización. Clarke (2018) habla de la definición de las constantes del modelo como la primera fase de la calibración. Las constantes son aquellos valores o elementos estructurales del modelo que definen su estructura interna y la forma en la que

el objeto de estudio es conceptualizado. Son, por ejemplo, el tipo de vecindad utilizada en el caso de los modelos de autómatas celulares (CA) o los valores de idoneidad topográfica para la ubicación de un determinado uso.

Mas et al. (2018), por su parte, diferencian, como tareas a realizar a la hora de calibrar un modelo, la selección y transformación de las variables dependientes e independientes empleadas en el análisis y los parámetros per se del modelo. Entre los parámetros, distinguen entre las cantidades a simular, la función que describe la relación entre el cambio LULC y los factores que explican este y los patrones espaciales y temporales.

Finalmente, para llevar a cabo la evaluación del resultado del modelo con la realidad observada, se siguen una serie de métodos o procedimientos que, en general, son similares, sino idénticos, a los empleados durante la tarea de validación (Mas et al. 2018). A modo de ejemplo, el procedimiento habitual de calibración del modelo Metronamica suele hacer uso, entre otros, de los estadísticos Kappa (Kappa, Fuzzy kappa, Kappa Simulation y Fuzzy Kappa Simulation) o de métricas espaciales (Van Delden y Vanhout 2018). Gran parte de la literatura académica ha puesto el foco de atención en el desarrollo de nuevos procedimientos y técnicas de evaluación de los resultados de los modelos, para ayudar en sus tareas de calibración y validación (Sohl y Claggett 2013).

4.5.2. LA SIMULACIÓN

Recogiendo la propuesta de Camacho Olmedo et al. (2018a), basada en las tesis de Coquillard y Hill (1997), diferenciamos una etapa de simulación entre la calibración y validación de un modelo LUCC, las dos fases usualmente apuntadas como las principales en el desarrollo de un ejercicio de modelización (Pontius Jr. et al. 2004; Gallardo Beltrán 2014; Van Vliet et al. 2016).

Esta etapa recoge el proceso de puesta en marcha del modelo, de tal manera que comprobamos como el objeto modelizado evoluciona en el tiempo, lo que nos permite comprender su comportamiento y, por tanto, cómo sus características evolucionan bajo diferentes premisas (Coquillard y Hill 1997). Se trata así de una fase superpuesta a la calibración del modelo, la cual supone correr la simulación y comprobar en qué grado la parametrización del modelo se ajusta a la realidad observada (Camacho Olmedo et al. 2018a). De esta manera, siempre que evaluamos una calibración, previamente hemos realizado la simulación del modelo.

Del mismo modo, siempre es necesario llevar a cabo una simulación para obtener un escenario, con lo que, en cierta medida, se superpone también esta etapa a la de propuesta de escenarios. Sin embargo, a diferencia de la calibración, la propuesta de escenarios y también de la validación, en esta etapa la participación del usuario es mínima y se refiere fundamentalmente a las decisiones tomadas durante la calibración. De este modo, la diferenciación de esta fase en el ejercicio de modelización responde más a criterios conceptuales, de cara a entender mejor el proceso de modelización, que prácticos, en relación con la labor realizada por el usuario.

Como parte de la etapa de simulación, el modelo genera dos tipos fundamentales de resultados: *soft outputs* y *hard outputs* (Camacho Olmedo et al. 2018a). Mientras los primeros muestran, para cada píxel, su aptitud de cambio potencial a cada categoría, los segundos muestran, para cada píxel, una única categoría, que se corresponde con aquella que el modelo ha establecido como la más apta para ese espacio, teniendo en cuenta, entre otros, la cantidad de cambio simulada, la inercia de los distintos usos y coberturas del suelo, así como los factores que determinan el cambio de éstos.

Los *soft outputs* se pueden generar tanto en el proceso de la simulación, es decir, en un momento intermedio, como al final de la misma. En el primer caso (*intermediate soft-classified maps*), estos no están condicionados a ninguna fecha concreta. En el segundo caso (*soft-classified maps*), se trata de los mapas de probabilidad para la fecha de la simulación realizada, en tanto tienen en cuenta las cantidades simuladas por el modelo (Camacho Olmedo et al. 2018a).

Según el tipo de modelo empleado, y tomando como referencia la distinción realizada por Camacho Olmedo et al. (2013), distinguimos entre dos tipos de *intermediate soft-classified maps*: mapas de potencial de uso del suelo (*Land Use Potential (LUP) maps*) y mapas de potencial de transición (*Transition Potential (TP) maps*). Los primeros muestran el potencial de cambio de cada categoría en cada píxel del área estudiada. A diferencia de éstos, los mapas de potencial de transición muestran, para cada transición modelada, el potencial de cambio de la categoría origen de transición a cambiar a la categoría destino de la transición. Son así estos últimos mapas específicos de los modelos que simulan transiciones de cambio entre dos categorías.

4.5.3. LA VALIDACIÓN

Tal y como hemos señalado previamente, entendemos por validación la evaluación del resultado del modelo con la realidad observable, a partir de datos independientes, no utilizados previamente como parte de la calibración (Pontius Jr. y Malanson 2005; Van Vliet et al. 2011). No obstante, este término, al igual que los anteriores, ha sido objeto de un profuso debate teórico y, por tanto, su definición puede presentar diferentes matices según el autor. Paegelow et al. (2018) y Rykiel (1996) pueden ser empleados como referencias para una introducción a tal debate conceptual.

Existe una gran variedad de enfoques para clasificar los diferentes procedimientos de validación existentes. Torrens (2011) realiza una primera división de éstos en dos grandes grupos: los enfoques cualitativos y los cuantitativos. Por su parte, Paegelow et al. (2018) y Van Vliet et al. (2016) proponen una clasificación más detallada de los segundos (enfoques cuantitativos).

Paegelow et al. (2018) consideran diferentes criterios para clasificar los métodos y técnicas de validación cuantitativos. En primer lugar, según el tipo de mapa validado, distinguen entre la validación de *soft* o *hard outputs*. Según el propósito de la modelización y, por ende, del ejercicio de validación, diferencian entre la validación de las cantidades

simuladas, de la localización de los cambios simulados o del patrón simulado. En este sentido, entendemos por patrón la característica disposición espacial de los objetos, según las relaciones que se establecen entre unos y otros (Unwin 1996). Finalmente, según la temática de la validación, Paegelow et al. (2018) distinguen entre la validación de los mapas resultado del modelo per se, o la validación de las dinámicas LUCC simuladas.

Van Vliet et al. (2016) diferencian entre cuatro enfoques de validación: la precisión de la localización de los cambios simulados; la precisión del patrón de los cambios simulados; análisis de incertidumbre; y análisis de sensibilidad. El primer enfoque recoge aquellos procedimientos de validación que tienen como fin evaluar que los cambios han sido simulados en la posición correcta, mientras que el segundo enfoque se centra en evaluar el patrón del cambio, entendido en términos de la composición y configuración de las distintas categorías que componen el mapa. En este sentido, la composición hace referencia a las cantidades en las que cada categoría está presente en el mapa, mientras que la configuración se refiere a la forma en la que esas categorías están localizadas, es decir, a su distribución espacial (Schmit et al. 2006). Van Vliet et al. (2016) definen el análisis de incertidumbre como la evaluación de los cambios producidos por un modelo en sucesivas ejecuciones sin que se hayan variado sus parámetros. El análisis de sensibilidad, a diferencia del anterior, sí evalúa los cambios en el modelo como consecuencia de una variación de sus parámetros.

Existe una gran variedad de técnicas para llevar a cabo la validación de los modelos. Bradley et al. (2016), Hagen-zanker (2006) y Paegelow et al. (2014) son algunos de los trabajos que hacen una profusa revisión de las mismas.

4.6. TIPOS DE MODELOS

Los modelos LUCC se pueden clasificar de acuerdo con una gran variedad de criterios, según los autores y teorías seguidas (Camacho Olmedo et al. 2018c). No existe así una clasificación única y comúnmente aceptada, lo que genera una cierta confusión a la hora de realizar una clasificación de los distintos enfoques de la LUCCM. Brown et al. (2004), Camacho Olmedo et al. (2018c) y Van Schroyen Lantman et al. (2011) realizan una revisión de algunas de las distintas clasificaciones propuestas.

Detallamos aquí aquellos criterios de clasificación de modelos LUCC más interesantes, en relación con los modelos y temas de análisis cubiertos por esta tesis.

4.6.1. SEGÚN LA ESCALA DE ANÁLISIS

De acuerdo con la escala de análisis, Agarwal et al. (2002) realizaron una caracterización de 19 modelos según tres dimensiones: espacial, temporal y toma de decisiones, si bien no proponen una clasificación concreta de los enfoques de modelización LUCC. Por su parte, Verburg et al. (2006) diferencian entre modelos a escalas globales y modelos a escalas regionales. Paegelow y Camacho Olmedo (2008) añaden a las anteriores las escalas

locales, señalando como las escalas locales y regionales siguen siendo las escalas comunes en la LUCCM.

Referido a la resolución temática, para el caso de los modelos LUCC urbanos, Dietzel y Clarke (2006) distinguen entre aquellos enfoques binarios, que distinguen entre cubiertas urbanas y no urbanas, y los modelos que consideran un mayor número de categorías. En relación con la escala, según la forma en la que el espacio es conceptualizado, se distinguen entre modelos vectoriales (*patch-based*) y modelos ráster (*cell-based*) (Koomen y Stillwell 2007; Wang y Marceau 2013; Abolhasani et al. 2016). Los primeros usan como unidad de análisis el píxel, que posee la misma forma y dimensiones para toda el área de estudio. Los segundos, el polígono vectorial, que puede ser irregular y contar con perímetros y áreas distintas.

4.6.2. MODELOS ESTOCÁSTICOS VS MODELOS DETERMINISTAS

Wainwright y Mulligan (2013) distinguen, para el caso de modelos basados en ecuaciones matemáticas, entre enfoques deterministas y estocásticos. Los primeros proporcionan, dado un conjunto determinado de parámetros, una solución única para cada ejercicio de modelización. De este modo, el objeto modelado es descrito sin ningún tipo de componente probabilístico (Paegelow y Camacho Olmedo 2008). Al contrario, los modelos estocásticos proporcionan un rango de soluciones posibles, al introducir variables aleatorias en el proceso de modelización (Wainwright y Mulligan 2013). Sí incorporan, por tanto, ese componente probabilístico.

Para el caso de los modelos de autómatas celulares (CA), García et al. (2011) distinguen dos tipos principales de modelos estocásticos: aquellos que se convierten en estocásticos a partir de la introducción de una perturbación estocástica en el cálculo del cambio potencial, como la propuesta de White y Engelen (1993), incorporada como parte Metronamica; o bien aquellos modelos que incorporan el componente estocástico a la hora de decidir qué celdas o unidades de análisis cambian. Dinámica EGO, por ejemplo, compara la probabilidad de transición de cada celda con un valor aleatorio, de tal manera que solo cuando la probabilidad de transición supera ese valor aleatorio, tiene lugar el cambio (Soares-Filho et al. 2002).

4.6.3. DE ACUERDO CON EL TIPO DE ESCENARIOS GENERADOS

En relación con las posibilidades que ofrecen para la producción de escenarios, Camacho Olmedo et al. (2018c) plantean la distinción entre modelos que producen escenarios continuistas (*business as usual scenarios*), que replican a futuro los procesos y relaciones observadas en el pasado, y aquellos modelos que producen escenarios contrastados, que permiten variar esos procesos y relaciones. De los modelos utilizados en esta tesis, Land Change Modeler (LCM) puede ser adscrito al primer grupo, mientras que el resto se puede clasificar como parte del segundo.

4.6.4. SEGÚN LA CONCEPTUALIZACIÓN DEL PROCESO DE SIMULACIÓN

En función de la conceptualización del modelo, y del elemento que estos simulen, Mas et al. (2014) distinguen entre modelos basados en patrones (*pattern-based models, PBM*) y modelos basados en agentes (*agent-based models*). Con una perspectiva más genérica, Brown et al. (2013) distinguen entre modelos basados en patrones y modelos basados en procesos (*process-based models*).

El patrón, como se ha comentado anteriormente, se refiere a la disposición espacial de las distintas categorías que componen un mapa, así como la relación espacial que existe entre los distintos fragmentos que componen cada categoría (Unwin 1996). Se entiende por fragmento un área homogénea del espacio, diferenciada de su entorno, que pertenece a una categoría concreta (Herold et al. 2005). Por su parte, un proceso se puede definir para la LUCCM como cualquier mecanismo que produce el cambio del estado de los usos y coberturas del suelo del sistema analizado (O'Sullivan y Perry 2013). Se entiende que cada proceso genera unos patrones característicos, y de ahí que los modelos basados en patrones simulen estos últimos de cara a entender los primeros (O'Sullivan y Perry 2013).

De este modo, los *pattern-based models* se orientan a la simulación de los patrones de los mapas empleados, con lo que procuran entender las causas que determinan el cambio de ese patrón, para simular éste a futuro. Al contrario, los *process-based models* tratan de replicar los procesos que originan las dinámicas del cambio LULC. Mientras en el primer caso se simulan los patrones, entendidos como consecuencia de los procesos que determinan el cambio, en el segundo tipo de modelos se simulan los mecanismos a través de los cuales se produce el cambio (Magliocca et al. 2015). De ahí que los modelos basados en agentes (*agent-based models*) sean un tipo de modelos basados en procesos, en tanto simulan el cambio en el área de análisis a partir de replicar el comportamiento de los agentes que participan del proceso o sistema estudiado (Crooks y Heppenstall 2012). Otros tipos de modelos basados en procesos son los modelos basados en sectores (*sector-based*) o los modelos económicos espacialmente desagregados (Magliocca et al. 2015).

4.6.5. DE ACUERDO CON LA METODOLOGÍA O TÉCNICAS EMPLEADAS

Los modelos LUCC pueden clasificarse también en función de las técnicas o metodologías que incorporan para llevar a cabo la simulación (Paegelow y Camacho Olmedo 2008; Camacho Olmedo et al. 2018c). No obstante, se trata de una clasificación complicada, por cuanto existe una enorme variedad de técnicas y métodos para simular el cambio de los usos y coberturas del suelo.

Encontramos en la literatura una gran variedad de clasificaciones de modelos LUCC que siguen este criterio, si bien cada una aportando una visión diferente del conjunto. En las siguientes líneas, hemos intentado agrupar estas clasificaciones en grupos, en función del tipo de técnica o metodología considerada, haciendo especial énfasis en aquellas empleadas en los modelos utilizados en esta tesis.

4.6.5.1. De acuerdo con el método empleado para relacionar la variable dependiente y las variables independientes

La división propuesta por Brown et al. (2004) entre modelos ajustados empíricamente (*empirically fitted models*) y modelos de procesos dinámicos (*dynamic process models*) se ajusta prácticamente a la perfección con la categorización anterior entre *pattern* y *process-based models*. Además, nos permite hacer referencia al método subyacente en la simulación, que en el primer caso (*empirically fitted models*), trata de encontrar la relación entre las tendencias temporales y/o los patrones espaciales observados con el conjunto de variables independientes introducidas en el modelo (Brown et al. 2004).

Según el método empleado para realizar este ajuste, se han propuesto una gran variedad de clasificaciones de modelos LUCC. Shafizadeh-Moghadam et al. (2017) distinguen entre modelos estadísticos, de inteligencia artificial y árboles de decisión. En el caso de los primeros, se utilizan funciones estadísticas para encontrar la relación entre la variable dependiente y las variables independientes. Algunos de los métodos estadísticos comúnmente empleados son la regresión logística o los pesos de evidencia (*Weights of Evidence*), incluidos en los modelos LCM y Dinámica EGO, respectivamente.

A diferencia de los anteriores, los métodos de inteligencia artificial y los árboles de decisión no asumen una distribución estadística particular de los datos, por lo que pueden ser aplicados a aquellos casos en los que no exista tal distribución (Olaya 2014). Entre los métodos de inteligencia artificial, son comunes en la LUCCM las redes neuronales (Van Schrojenstein Lantman et al. 2011). Se trata de modelos computacionales de autoaprendizaje, en los que la relación entre la variable dependiente y las variables independientes se produce a través de una red de relaciones, a las que se otorga un peso, y que el algoritmo empleado ajusta de manera iterativa (National Research Council 2014). LCM es, de los modelos empleados, el que más peso da este tipo de técnicas, a través de las funciones Multilayer Perceptron (MLP) y SimWeight (Eastman y Toledano 2018). Dinámica EGO incluye un algoritmo genético (*genetic algorithm*) para llevar a cabo el cálculo del potencial de transición (Mas et al. 2014). Clarke (2018) realiza una descripción de esta técnica para el caso de la LUCCM.

Desde el National Research Council (2014) incluyen los árboles de decisión como parte de los métodos de inteligencia artificial. Se trata de una herramienta de minería de datos que divide el espacio de las variables explicativas en distintas áreas de manera repetida, utilizando puntos de ruptura que minimizan los errores de predicción y asignan las áreas de cambio a la clase más probable (Altartouri et al. 2015).

4.6.5.2. Según el uso o no de autómatas celulares (CA)

Gran parte de los modelos empleados en la LUCCM son modelos de autómatas celulares (Van Schrojenstein Lantman et al. 2011) que, en este sentido, han ido ganando una creciente fama. Su clasificación en el conjunto de los modelos LUCC resulta compleja. La

mayor parte de las clasificaciones presentan a estos modelos como un tipo único y distinto del resto (Brown et al. 2013; Sohl y Claggett 2013; National Research Council 2014). De ahí que, en los distintos criterios que aquí presentamos para la clasificación de los modelos LUCC, su condición de modelo CA sea uno de los criterios considerados.

En los modelos CA las dinámicas simuladas quedan determinadas por la relación de cada unidad de análisis con sus vecinas, de tal manera que las relaciones a nivel local juegan un papel fundamental en la modelización de los cambios. Esto permite generar, a partir de una serie de reglas simples, comportamientos muy complejos, lo que constituye una de las principales fortalezas de estos modelos (White et al. 2015). En este sentido, se trata de modelos simples, no complicados, capaces de replicar sistemas complejos, como las ciudades (Barredo et al. 2003).

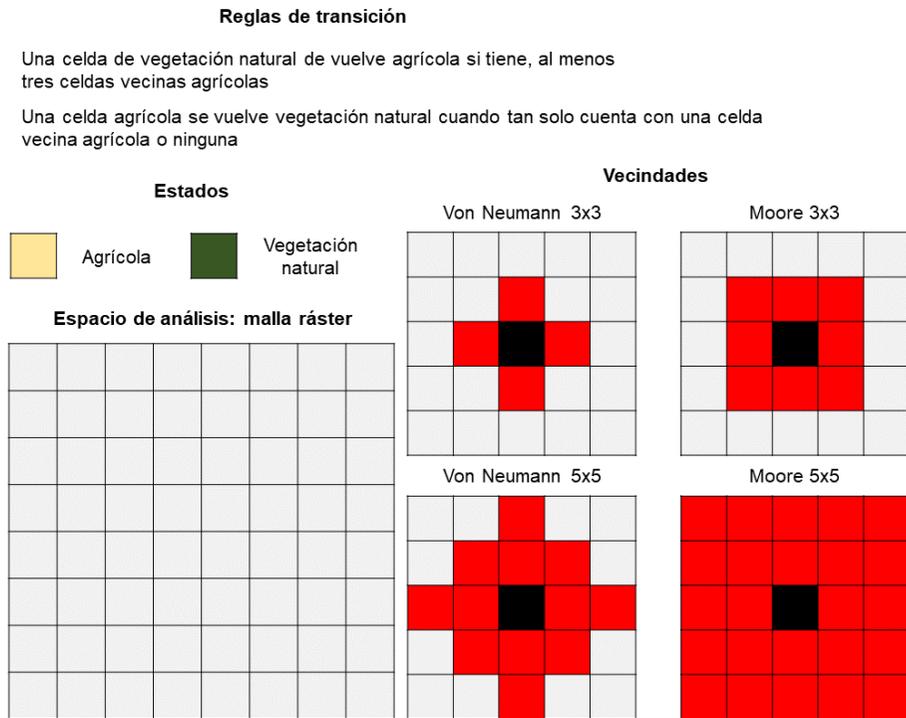


Figura 4.3. Relación de componentes básicos de un modelo de autómatas celulares (CA). Ejemplo teórico para un modelo CA simple con dos estados: agrícola y vegetación natural. Fuente: elaboración propia

Un modelo CA siempre consta de los siguientes elementos: un espacio de análisis, dividido en diferentes unidades; diferentes estados o categorías de esas unidades; una vecindad y una serie de reglas de transición (Fig. 4.3) (Leao et al. 2004). Si bien inicialmente presentaban formas muy simples, éstas se han ido haciendo cada vez más complejas con el paso del tiempo (Santé et al. 2010).

4.6.5.3. Según el empleo de otras técnicas

Como hemos señalado previamente, existen numerosas técnicas y métodos que pueden ser incorporados en un modelo LUCC. No es el objetivo de esta tesis realizar una revisión sistemática de cada uno de ellos. Incluimos en este apartado, por tanto, aquellas técnicas incorporadas en algunos de los modelos empleados en esta investigación y que pueden servir también para caracterizar estos modelos del cambio de usos y coberturas del suelo.

Entre ellas, cabe destacar las Cadenas de Markov (*Markov Chains*), incorporadas en CA_Markov, Dinamica EGO y Land Change Modeler. Se trata de una técnica comúnmente empleada para calcular la probabilidad de cambio de las diferentes categorías de usos y coberturas del suelo y, por tanto, para inferir las cantidades a simular como parte del ejercicio de modelización (Camacho Olmedo y Mas 2018). De este modo, se trata de un análisis no espacial y que, por tanto, no puede ser utilizado para otro fin que no sea el cálculo de esas cantidades de cambio (Van Schrojenstein Lantman et al. 2011).

Las Cadenas de Markov se basan en el concepto de procesos de Markov, en los cuales el estado de un proceso en un momento $t+1$ es dependiente de su estado en un momento anterior (t_1) (Benenson y Torrens 2004). Las Cadenas de Markov pueden ser de primer o segundo orden. En el primer caso, las probabilidades de cambio de las categorías del sistema analizado dependen de su situación previa para un momento dado y del criterio de cambio introducido por el usuario. En el segundo caso (Cadenas de Markov de segundo orden), la matriz de probabilidad es construida a partir de los cambios de la variable medidos para dos momentos pasados (Van Schrojenstein Lantman et al. 2011). Los modelos LUCC hacen uso de este segundo tipo de Cadenas de Markov, al obtener las probabilidades de cambio de los usos y coberturas del suelo a partir de la comparación de dos mapas de usos y coberturas del suelo en dos fechas distintas.

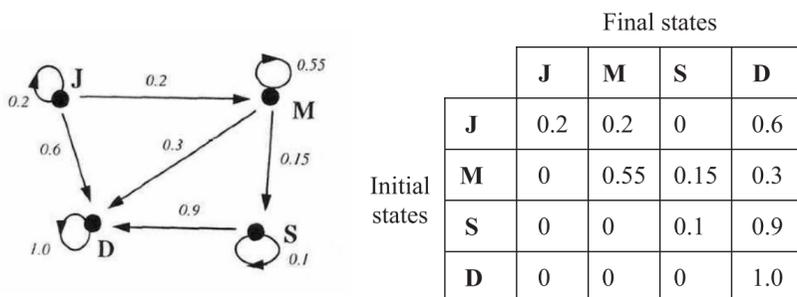


Figura 4.4. Matriz de Markov para un ejemplo teórico de una población con cuatro estados (J, M, D y S). A la izquierda, se muestran los estados de la población y la relación gráfica entre éstos. A la derecha se incluye una matriz de probabilidad Markov de tales estados. Fuente: tomado de Paegelow y Camacho Olmedo (2008) y Coquillard y Hill (1997).

Como resultado, se obtiene una matriz de Markov, que indica la probabilidad de cada categoría a cambiar al resto de clases que componen el mapa o bien a mantener su con-

dición (Fig. 4.4). En la LUCCM, los modelos suelen traducir estas probabilidades en términos de área (Camacho Olmedo y Mas 2018), normalmente entendida a través de unidades de píxel.

4.7. CONCLUSIONES

Un modelo LUCC es, por tanto, una herramienta que nos permite llevar a cabo el estudio y análisis de la evolución de los usos y coberturas del suelo para un determinado espacio. Como herramienta, permite realizar una abstracción del sistema real analizado de acuerdo con los objetivos de nuestro estudio. En la realización de tal proceso, el usuario cuenta con un gran número de enfoques y técnicas entre las que elegir.

En función del enfoque y técnicas empleadas, las tareas desarrolladas por el usuario serán diferentes. En cualquier caso, este siempre debe de seguir una serie de pasos esenciales en el desarrollo del ejercicio de modelización: conceptualización del objeto de estudio, implementación matemática del modelo y calibración y validación del mismo. En función de las decisiones tomadas a lo largo de estas etapas, el ejercicio de modelización contará con una serie de incertidumbres. Los siguientes capítulos de esta tesis realizan una aproximación a estas fuentes de incertidumbre y llevan a cabo un análisis de las mismas para una aplicación específica.

Chapter 5

Uncertainty challenge in geospatial analysis. An approximation from the land use cover change modelling perspective ¹

5.1. INTRODUCTION

Geospatial data and analysis have been gaining an increasing importance in the last decades, achieving a prominent position in the study, management and solution of many of the problems that our society copes with. Geospatial analysis is used to study many current and future challenges, such as climate change, urban sprawl and environmental degradation. However, there are still unresolved questions about the limits of those studies and, specifically, about the uncertainty that their conclusions convey.

Little attention has been paid to all sources of uncertainty that particular geospatial studies convey. Despite the widespread use of geospatial tools and methods, users are still not aware of their uncertainties and how their decisions affect those. Neither are the audience nor the agents, for whom uncertainty acts as a barrier for adoption of the conclusions from geospatial analysis in their decisions. That is why more and better information about uncertainty in geospatial analysis is needed. In this regard, Goodchild (1991) and Hunter (1999) laid out an uncertainty research agenda to achieve better methods for uncertainty management and hence understanding of the problem. This agenda has not been met yet. In addition, despite the increasing awareness and research about uncertainty, the uncertainty recognition is not widely spread across most of the geospatial research and studies. Accordingly, we present here the uncertainty issue as one of the key geospatial challenges of the XXI century.

To remark the importance of this topic and make users aware about the extent of the issue, this chapter gives a general overview about concepts, sources and methods to deal with uncertainty in geospatial analysis. We address this topic from a Land Use Cover Change Modelling (LUCCM) perspective. LUCCM integrates many geospatial tools, processes and data in just one wide analysis. Accordingly, this perspective covers most of the uncertainty issues that any user must face.

¹ This chapter has been accepted for being published as a book chapter in the book *Geospatial Challenges in the 21st Century* and is currently under review.

García-Álvarez D, Van Delden H, Camacho Olmedo MT, Paegelow M. Uncertainty challenge in Geospatial analysis. An approximation from the Land Use Cover Change Modelling perspective. In: Koutsopoulos K, de Miguel González R, Donert K (eds) *Geospatial Challenges in the 21st Century*. Springer. Accepted.

5.2. WHAT DOES UNCERTAINTY MEAN?

There are many definitions of uncertainty, which range from generic approaches to those which focus on specific fields of knowledge. In general, all authors agree in referring to the difference between the perfect representation of any feature or process and how it is really addressed through data and geospatial tools when talking about uncertainty. Given this difference, authors talk about doubt, reliability, lack of knowledge, degree of distrust, etc to define uncertainty as the user perception about how that difference affect their studies. In other cases, uncertainty also refers to the confidence that an agent has when using geospatial data to make decisions. All in all, in simple terms, uncertainty can be defined as the lack or the degree of certainty about any data or geospatial analysis consequence of the difference between reality and geospatial data or processes.

Many concepts arise when talking about uncertainty, like ignorance, error, accuracy, vagueness or ambiguity. They refer to specific aspects of uncertainty or issues that this term does not cover. Their definition is therefore essential to clarify the conceptual framework of uncertainty, which we have proposed in Figure 5.1.

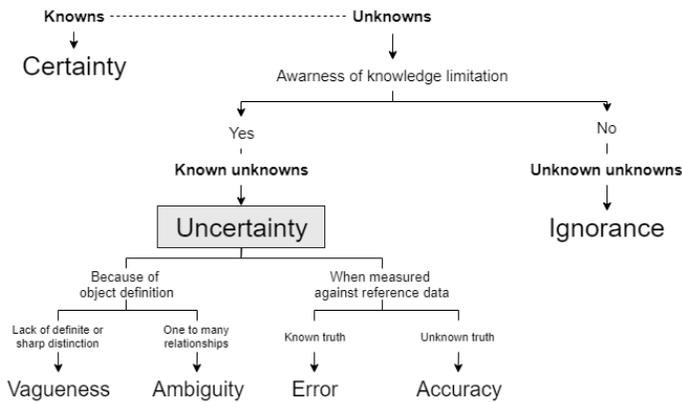


Figure 5.1. Conceptual chart of uncertainty and related concepts. Source: partially based on Klir and Wierman (1999) and Gómez Delgado and Barredo (2006)

Whereas uncertainty implies that the user is aware about the limitation of his knowledge, ignorance exists when there is not such awareness. It is therefore related to the unknown unknowns, that is, those aspects that we don't even know we don't know (Recker 2015).

Error is objective and, hence, quantitative. It is a measure of the distance between reality and our representation. Accordingly, it just refers to those features which can be measured and quantified. For land cover data, as a forest density map, error could be measured from the difference between the forest density of a pixel and the real density measured over the ground. Accuracy is the closeness of observations to the truth (Kemp 2008). As an ideal, complete truth is usually unachievable. Ergo, that reference comes

with uncertainty that the accuracy assessment, unlike the uncertainty analysis, does not consider. When assessing a simulated map to a reference map for the same area, we are checking the accuracy of our simulation.

On the other hand, vagueness and ambiguity are qualitative types of uncertainty and, specifically, refer to the certainty at which objects or phenomena are delimited. Vagueness refers to the poor or precise definition of classes or objects, whereas ambiguity arises when the same object can be classified as part of different groups or assets. The former is more about the object definition and ambiguity about the object classification. For land use data, vagueness arises when we are not completely sure about what the label of a class, like urban fabric, covers. Is it urban fabric a village where most of the land is dedicated to agricultural uses? Or could be classified as agricultural? Ambiguity arises in similar cases, when we are managing not well defined classes which, therefore, can be assigned to more than one category. Is it agroforestry an agricultural class or a natural vegetation one?

5.3. THE THREE DIMENSIONS OF UNCERTAINTY

Following the proposal made by Refsgaard et al. (2013), we differentiate three dimensions of uncertainty as follows: source, level and nature (Fig. 5.2).

- The source is the dimension which gives information where the uncertainty manifests itself. Several studies have proposed a generic classification of sources of uncertainty for modelling environments (Van Asselt 2000; Walker et al. 2003; Refsgaard et al. 2007, 2013; Klein Goldewijk and Verburg 2013; Uusitalo et al. 2015) or even for categorical maps (Aspinall and Pearson 1995) and spatial data obtained through remote sensing analysis (Congalton et al. 1991; Chuvieco 2016).
- The level of uncertainty is the degree of doubt, reliability or lack of knowledge. It moves from complete knowledge and, consequently, absence of uncertainty, to total ignorance.
- The nature of uncertainty is the type of uncertainty we are working with. Literature usually distinguishes to this end between uncertainty due to imperfect knowledge and uncertainty because of natural phenomena variability, being the last one identified as knowledge or epistemic uncertainty and the first one as aleatory, stochastic or ontic uncertainty. Ascough et al. (2008) distinguish different components of the epistemic uncertainty: natural, human, institutional and technological, depending on the source of the variability. Uusitalo et al. (2015) added to the previous two the linguistic uncertainty, which arises from language issues. Refsgaard et al. (2013) considered the ambiguity as a third nature of uncertainty. It refers to the different possible ways of understanding the same system. Another distinction differentiates between reducible and non-reducible uncertainties and between those measurable and, therefore, quantifiable, and those which are not.

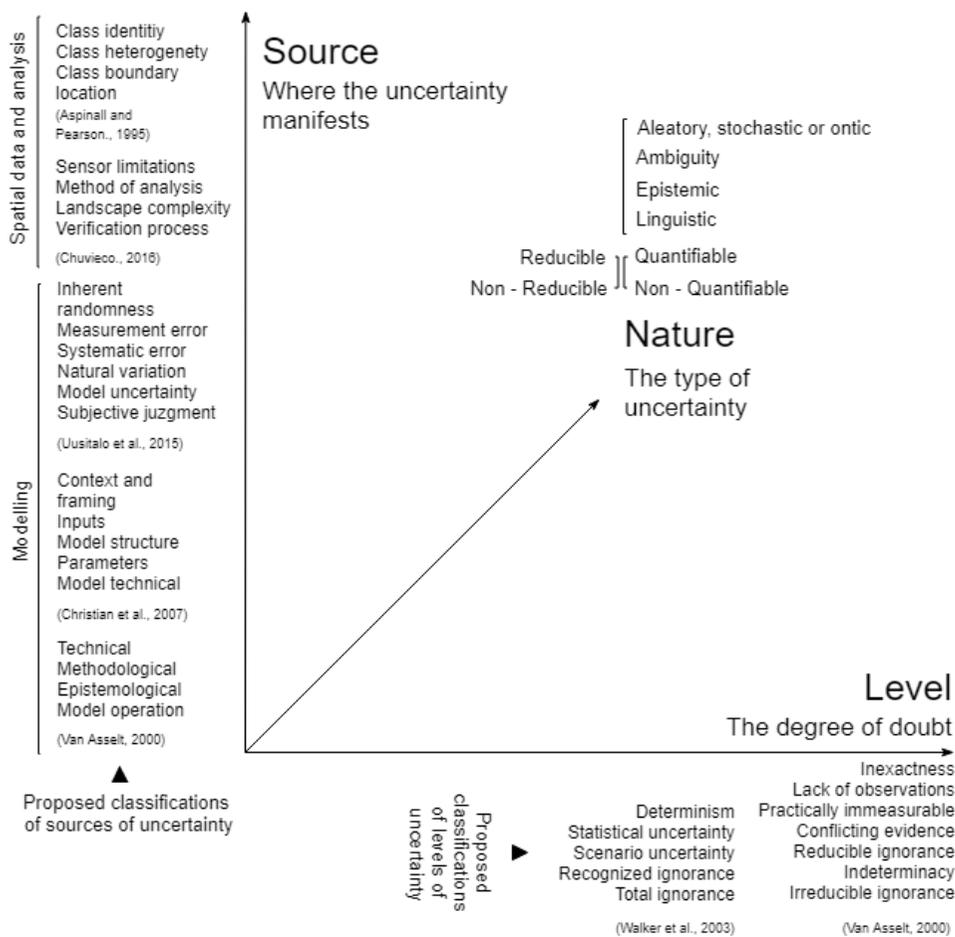


Figure 5.2. The three dimensions of uncertainty. Source: based on Walker et al. (2003)

5.4. SOURCES OF UNCERTAINTY IN GEOSPATIAL ANALYSIS. AN APPROXIMATION FROM THE LUCCM PERSPECTIVE

Many sources of uncertainty can be pointed out when studying the uncertainty in LUCCM or any geospatial analysis. Accordingly, several papers have tried to propose a classification, as pointed out in the previous section and reviewed by Matott et al. (2009). However, those classifications, as the one proposed here (Fig. 5.3), are just theoretical frameworks aiding in the comprehension and management of uncertainty. The user must be aware of the complex interactions between all sources of uncertainty and the difficulty of individualizing any of them.

All together, they are known as output uncertainty (Refsgaard et al. 2007) or the uncertainty cascade (Refsgaard et al. 2013), that is, the combination of all uncertainties that a result from a geospatial analysis conveys.

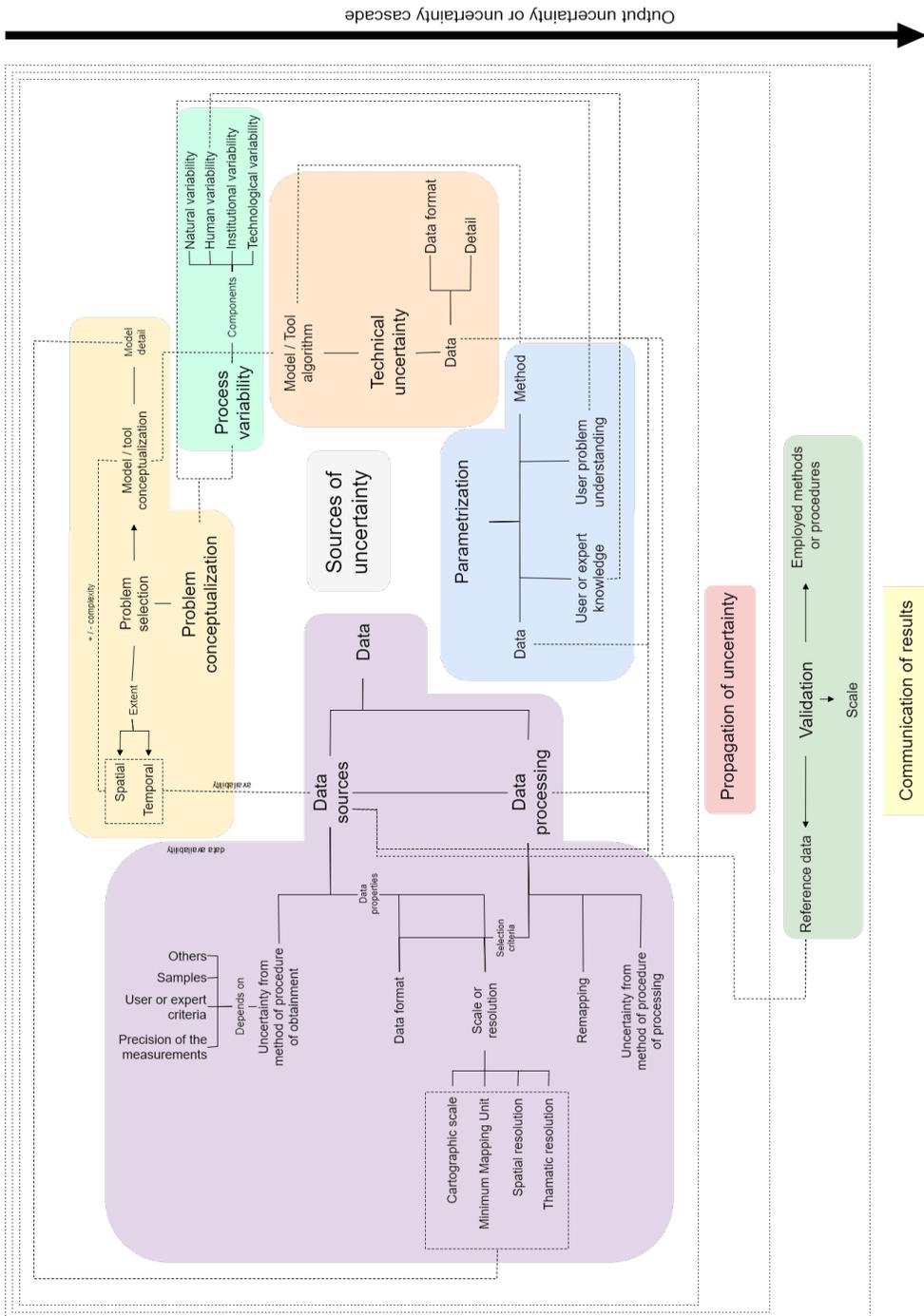


Figure 5.3. Author's proposal of sources of uncertainty in Geospatial Analysis from a LUCCM perspective. It represents the main sources of uncertainty as well as the interactions between them (dotted lines)

5.4.1. PROBLEM CONCEPTUALIZATION

The problem conceptualization can be considered as one of the most important sources of uncertainty, since it comes from the very initial decisions of any analysis, which will shape the study to be carried out. Geospatial data and analysis, as LUCCM, means simplifying the real world and phenomena. When doing this, the user conceptualizes them. The coherence of that conceptualization and how it fits with the problem to be studied or resolved, determine the goodness of the managed concepts and the level of uncertainty that the study conveys.

The very first decision comes from the selection of the problem to be studied. Problems are usually complex and related to other processes. Accordingly, their selection is usually difficult and, a lot of times, not very well reasoned. There are not widespread methods to deal with this issue, although Dunn (2001) proposed a context validation framework which can serve as basis to this end. For modelling environments, several papers have addressed, as part of general guides for setting up models, these conceptual questions, pointing out, among other recommendations, the need of engaging agents and final users in these decisions (Van Delden et al. 2011; Elsayah et al. 2017).

Once the problem to be analysed is chosen, it is necessary to define its boundaries. These are not usually real, given the continuation of the earth processes and features. Choosing different temporal or spatial extents for the same problem (Fig. 5.4) may result in different outputs, as showed by papers studying the spatial (extent) (Verburg and Veldkamp 2004) and temporal scale (Pontius Jr and Spencer 2005; Rosa et al. 2015) influence in LUCCM. Every spatial extent must be linked to a conceptualization level of the system under study: when working at continental scale, the system's conceptualization should not be as detailed as a national or regional scale. That is why not always more detail or complexity means better performance (Wainwright and Mulligan 2013). Thematic or spatial resolutions, that is, model detail, should be therefore chosen considering these criteria.

Regarding the temporal extent, the more length the LUCCM simulation has, the higher the uncertainty that it contains, given the unknown variability of the real-world processes (epistemic uncertainty). As most LUCCM rely on historical data to be calibrated, the temporal resolution of these data, i.e. the temporal extent of the calibration period, also affects the obtained results (Burnicki et al. 2010). This resolution must consider the variability of the processes over time, avoiding periods when other processes produced the changes that took pace. The resolution must also be high enough as to avoid noise and the influence of one-off events in the process comprehension. A detailed analysis of the processes and dynamics of the area under study is therefore essential.

The model conceptualization is then, for LUCCM, the critical step in the problem definition. Model conceptualization means the simplification of the system to be modelled into terms that are understandable, as simple as possible and, especially, able to to

be implemented through a software. This conceptualization will be affected by the modeller experience and preferences (Klein Goldewijk and Verburg 2013), but also by the data available and the feasibility to be implemented in a specific algorithm. Accordingly, there is a close link between problem conceptualization uncertainty and the one arising from data and technical issues.

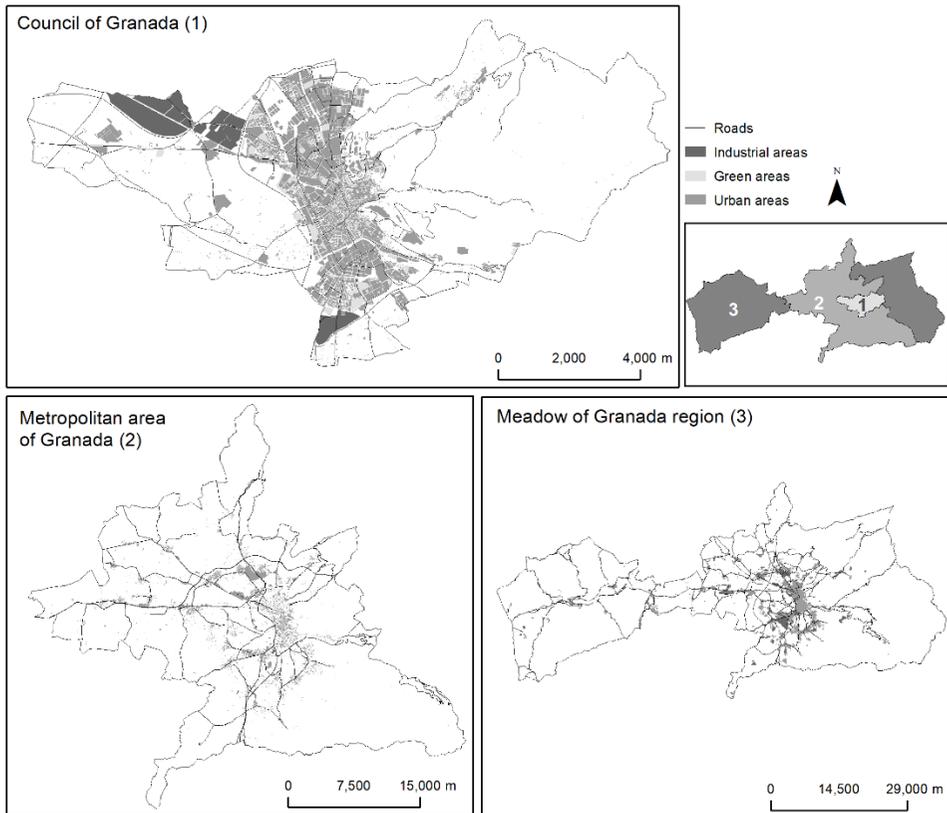


Figure 5.4. Different spatial extents and approaches for the study of the Granada area (Spain). Every extent match with a specific level of spatial and thematic detail. They refer to different type of boundaries (political (1), planning (2) and agricultural management (2)). Sources: DERA (IECA), BCN25, BCN100 (IGN)

When conceptualizing the model, one must consider that more complexity does not always mean less uncertainty, but can also lead to the opposite (Van Asselt 2000). Complex models are not easy to understand, making the engagement of agents and final users difficult. Complex models also require many parameters and complex algorithms, making the technical and parameter uncertainties very high. As previously stated, when managing the complexity, the user must keep in mind the thematic or spatial resolution of the data and model, since they are the main source of model detail.

Finally, the model conceptualization must ensure that all processes and interactions of interest are in the model, that is, the model completeness.

5.4.2. DATA SOURCES AND PROCESSING

A big part of the uncertainty of any analysis comes from data. The utility of the analysis will rely on the uncertainties of these data and how data are used. Depending on the study purpose, data uncertainties will play a major or minor role.

LUCCM usually trust data to set up the starting conditions of the model and to parametrize (calibrate) and validate it. Accordingly, data plays a key role in the obtained results. This role will be all the more meaningful as the dependence on data of the model, being decisive in the case of data-driven models.

We differentiate between those uncertainties that data come with, which are unavoidable, and those caused by data processing. In this regard, most geospatial analysis require data at specific formats or resolutions. This demands performing data treatments that, as any geospatial analysis, introduce new sources of uncertainty. Altogether, for LUCCM they are also known as input uncertainty (Refsgaard et al. 2007).

Every data comes with uncertainty, even in the case of raw data obtained by measurement or surveys. Because it is unavoidable, the user needs to know as much information as possible about it, ergo they can understand the limits that these data put in their analysis. Sometimes accuracy or uncertainty reports attach with data. However, this information is uncertain as well, because of the uncertainty of the validation process.

The reports of Land Use Land Cover (LULC) maps usually assign them an overall accuracy around 80% (Pontius Jr. and Lippitt 2006). LUCCM makes use of them to study LULC changes. However, changes often represent a small portion of the maps, smaller than the 20% of the map that is not accurate. Consequently, identified changes can be affected by high uncertainties, which will propagate to quantity of changes estimation or model parametrization. Therefore, it should be required providing information about the uncertainty of the measured changes (Pontius Jr. and Lippitt 2006) as well as the distinction between technical and real changes (Verburg et al. 2011). In this regard, Burnicki et al. (2010) pointed out that the LUCCM reliability mainly depends on the certainty of the observed changes, being the uncertainty analysis of LULC changes a priority line of research.

For categorical data, as LULC maps, we can broadly distinguish between two main sources of uncertainty: the categorical or thematic uncertainty, that comes from the attribute definition, and the positional uncertainty, which comes from the object position (Castilla and Hay 2007).

Numerous causes explain for every case the extent and importance of those sources of uncertainty. From all them, scale is maybe the key factor. The smaller or coarser the scale, the higher the abstraction and, therefore, the bigger the uncertainty, both categorical and positional. Notwithstanding, at finer scales, the definition of elements must be more detailed, being higher the chance of error. They can also provide too much detail, making the analysis too complex. Lloyd (2014) and Quattrochi and Goodchild (1997) provide a first introduction to deal with the scale issue in geospatial analysis.

The comparison of several datasets at different scales for the same study area (Fig. 5.5) has proved the scale influence in data uncertainty (Waser and Schwarz 2006; García Martínez et al. 2015). The chosen scale is also important when processing the data, as showed by studies analysing the impact of the thematic (Aldwaik et al. 2015) or spatial resolution (Díaz-Pacheco et al. 2018), and the minimum mapping unit (García-Álvarez 2018) on data.

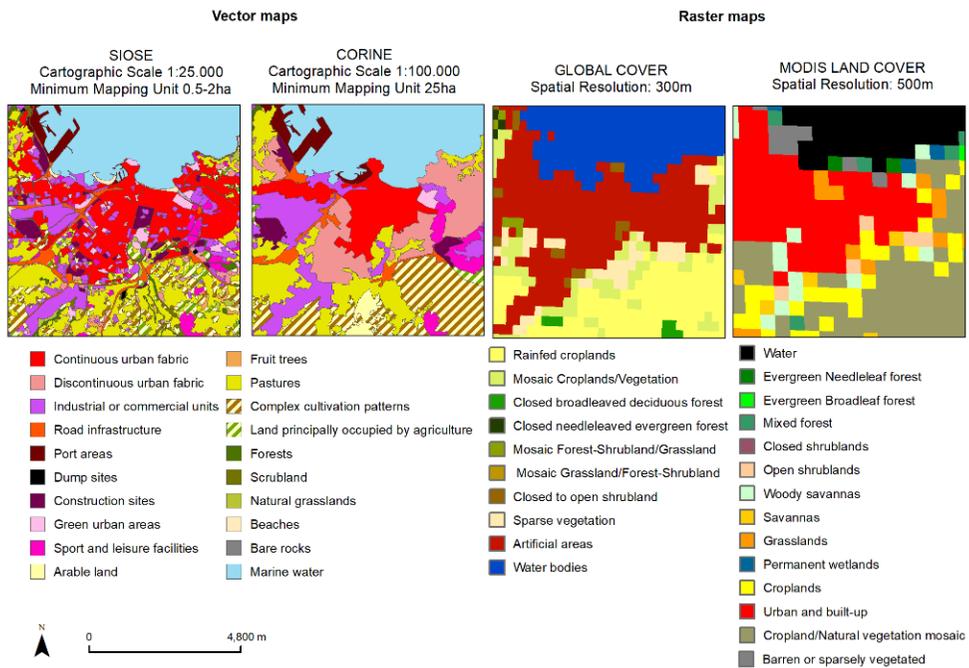


Figure 5.5. Comparison of different LULC datasets with different formats and at different spatial and thematic resolutions for a test area (Gijón, Spain) in 2005. Sources: SIOSE 2005, CLC 2006 (IGN), GlobCover 2005, MODISLC 2005

The resampling method employed to change the spatial resolution affects the obtained maps as well (Fig. 5.6) (Dendoncker et al. 2008). Regarding the thematic resolution, for LUCCM, some classes, as construction sites, need to be remapped to fit with the model conceptualization. The way this treatment is made introduce new sources of uncertainty.

Thematic uncertainty for categorical data also depends on expert knowledge in the case of data obtained by photointerpretation. When obtained by classification techniques, uncertainty comes from the employed tool and the training procedure. According to Grinblat et al. (2016), maps obtained through remote sensing are far from the requirements of LUCCM, due to the high uncertainties of these methods introduce compared to traditional photointerpretation. Nevertheless, in both cases it is difficult finding a temporal consistency between maps that allows the user an adequate analysis and comprehension of LULC changes (Verburg et al. 2011). The recent changes in the method used

in the production of CORINE Land Cover for some countries is, in this regard, a perfect example of those difficulties (García-Álvarez and Camacho Olmedo 2017).

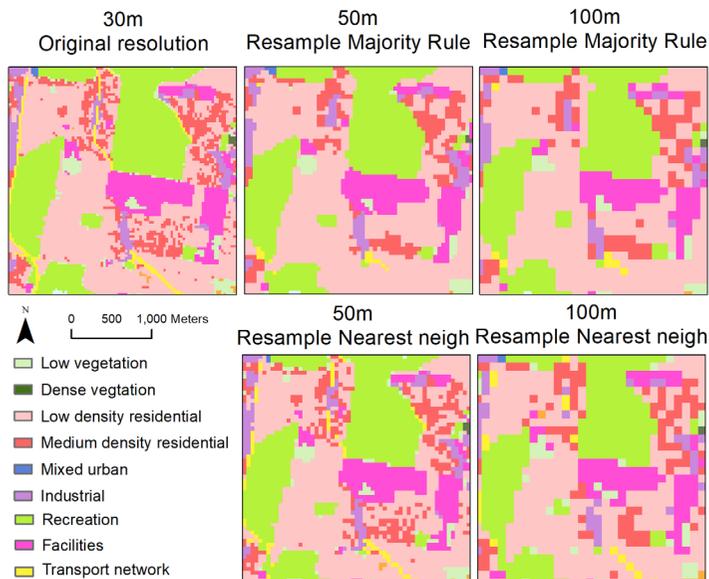


Figure 5.6. Influence of different resampling methods and spatial resolution in the pattern and proportions of a LULC map made by the author for the Kensington suburb (Sydney).

On the other hand, positional uncertainty depends on data format (raster vs vector) (Fig. 5.7). When processing data to change this format, new uncertainties are also introduced (Congalton 1997). Tons of information about pros and cons of one or another format can be found in any GIS manual.

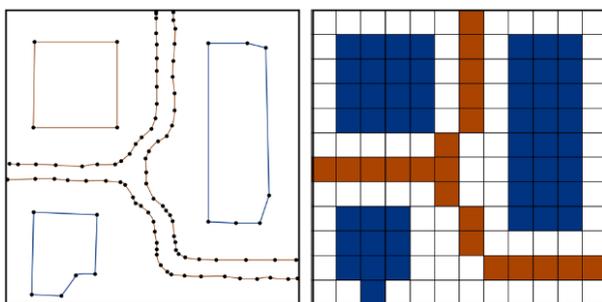


Figure 5.7. Differences in the representation of the same features under vector (right) and raster (left) formats. Source: taken from Olaya (2014)

Most data are usually produced for specific purposes, so their use for other aims, as LUCCM, can introduce new uncertainties. All in all, big efforts must be made in the uncertainty analysis of data. For LUCCM, there is still a great need of sources suitable to the needs and requirements of this type of analysis.

5.4.3. TECHNICAL UNCERTAINTY

It refers to the uncertainty that arises from the computer implementation of tools and data, that is, from the translation of concepts to computer entities and tools. It is therefore related to the problem conceptualization uncertainty, since the possibilities of addressing a problem will be given by the technical limits that computers put.

Regarding data, this uncertainty comes from the format and data detail, taking part of the data uncertainty (Section 5.4.2). For LUCCM, technical uncertainty mostly comes from the model algorithm.

Some model approaches are designed for specific applications, whereas general approaches, as CA_Markov or Metronamica (Fig. 5.8), can be applied to a wide range of problems (Torrens 2011). Whereas the first ones provide an adjusted solution for a particular problem, allowing the reduction of the technical uncertainty to the minimum, the second ones allow more research about their limits and disadvantages, as about the uncertainty that they convey. That is why some authors appeal to put the effort in the improvement of these general models (Hewitt et al. 2014).

When selecting or developing a computer model, one must consider the desired complexity. Following the Lee (1973) recommendation, the user must strike a balance between model complexity and data. That is, the model must not be more complex than the data in which it is based. Neither as complex as to avoid agent engagement and user comprehension.

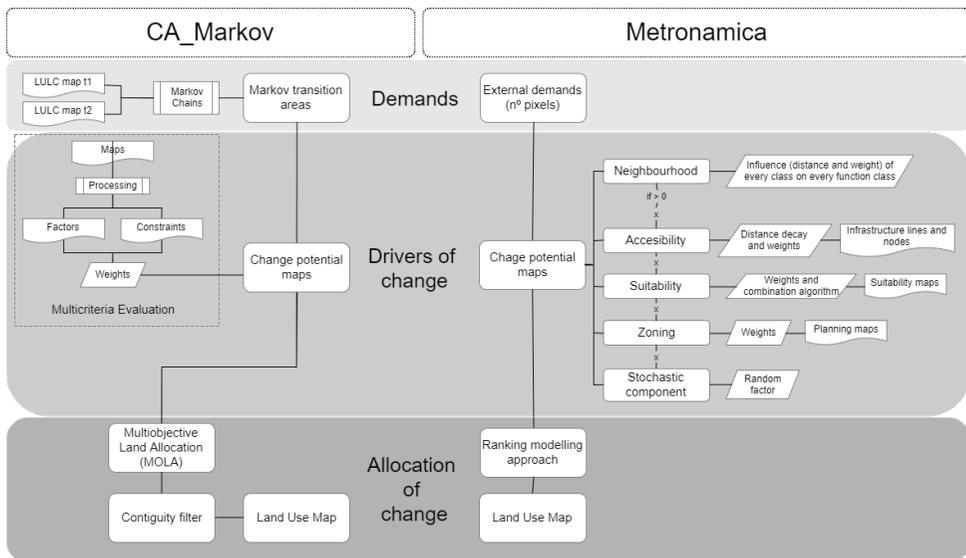


Figure 5.8. Author's comparison of the structure of two common LUCCM approaches: CA_Markov and Metronamica

Several model approaches can be distinguished² (Yeh and Li 2003; National Research Council 2014), which go from data-driven to knowledge-driven models. Data-driven models incorporate statistical or automatic methods for finding the relation between the dependent and independent variables, that is, to determine the model parameters. In the case of expert-driven approaches, these parameters are decided by expert judgment. Every method introduces a different type of uncertainty in the model parametrization, as we will see in the next section and in the Chapter 11 of this investigation.

5.4.4. PARAMETRIZATION

The way a geospatial tool, as a LUCC model, is parametrized (i.e. calibrated) determines the utility of the results. Poor parametrizations end in meaningless conclusions. Accordingly, attention must be paid to the uncertainties of this process.

Parameter uncertainty is affected by model structure (technical uncertainty) and data, but also by the problem conceptualization and the user understanding of all the analysis and concepts. Open or poor defined systems are more complex to understand and, ergo, more difficult of parametrizing. User knowledge and understanding of the system (real and conceptualized) is vital to get a correct parametrization. Notwithstanding, the importance of user knowledge in the parameter uncertainty will depend on the role that they play on the model (technical uncertainty).

In statistical or automatic approaches, most of the uncertainty comes from the method used. Some of them are described as black boxes. The user cannot understand how they find the relation between drivers and changes, which makes very uncertain the obtained result. These approaches are also affected by methodological issues as multicollinearity, autocorrelation, the Modifiable Areal Unit Problem, the Ecological Fallacy Problem or the Category Aggregation Problem³ (Pontius Jr and Spencer 2005). In addition, if the method needs to be technically parametrized through modeller criteria, uncertainty can be also introduced because of human subjectivity (Jafarnejhad et al. 2012).

In knowledge-driven approaches uncertainty mostly comes from the user understanding of both the process and the conceptual model. Some authors stated that user knowledge is case-specific and, therefore, uncertain (Botterweg 1995). Statistical or automatic procedures guarantee repeatability over study cases, which is not possible under knowledge-driven approaches. However, practical experience of the authors showed that, when working with a meaningful group of agents, there is a common consensus and, therefore, a way of repeatability.

In both approaches, data uncertainty plays a decisive role. Most parametrizations, at least for LUCCM, are based on historical data and, therefore, will be as certain as data are (Batisani and Yarnal 2009). Notwithstanding, whereas data uncertainties are avoidable

² For a detailed characterization of LUCC models according to their characteristics, refer to Chapter 4.

³ For a detailed description of some of these problems, refer to Chapter 6.

through user intervention, that is not possible if the method is completely statistical or automatic.

Scale and resolution can be used as tools to reduce the uncertainty of the parametrization. By changing the temporal (Bolliger et al. 2017), spatial (Ménard and Marceau 2005) or thematic resolution (Conway 2009), the user can discard information which cannot explain and, therefore, for which parameters are uncertain. Thus, the degree of detail and, therefore, the complexity, must be decided according to the parameters and issues that can be explained by knowledge or data.

5.4.5. VALIDATION AND PROPAGATION OF UNCERTAINTY

Once the analysis is performed, we usually validate the obtained results. These come with an additional uncertainty to those referred previously: the one that arises from the propagation of the other uncertainties when data and processes, and their uncertainties, interact. Because of this origin, it is so difficult to be studied and usually takes part of the called unknown unknowns, as we are not usually aware about their existence and extent. That is why its study has been pointed out as an important research need (Gómez Delgado and Bosque Sendra 2004; Hunter 2005).

The bigger the number of data and components, the more important the propagation of uncertainty, being especially meaningful for integrated modelling (Van Delden et al. 2011). The user must avoid those data or methods which introduce great sources of uncertainty, trying to keep an equilibrium between all sources of uncertainty that will take part of the analysis.

Several studies have tried to quantify the propagation of uncertainty (Tayyebi et al. 2014; Ferchichi et al. 2017). From a conceptual point of view, Yeh and Li (2006) tried to study this topic for a Cellular Automata model.

The validation of the analysis results, including the above-mentioned source of uncertainty, is usually performed against reference data. However, there is a great deal of methods and tools to perform this validation, which come with different sources of uncertainty as well (Fig. 5.9). If using reference data, the uncertainty that they convey also affects the uncertainty of the validation.

When validating data, as LULC maps, the sample strategy in case of field validation data or the reference data uncertainty in the case of data comparison validation, are important sources of uncertainty. Regarding the methods, there are a wide literature about validation tools and techniques acknowledging their limits. For LUCCM, are noticeable the critics to the Kappa statistics (Pontius Jr. and Millones 2011), which have been answered by the development of new Kappa measures that account for the LULC changes (Van Vliet et al. 2011). Different concepts and methods as the null resolution, fuzzy similarity or integrated validation tools have been proposed in the research about the validation limits and uncertainties (Hagen 2003; Pontius Jr. et al. 2004; Bradley et al. 2016).

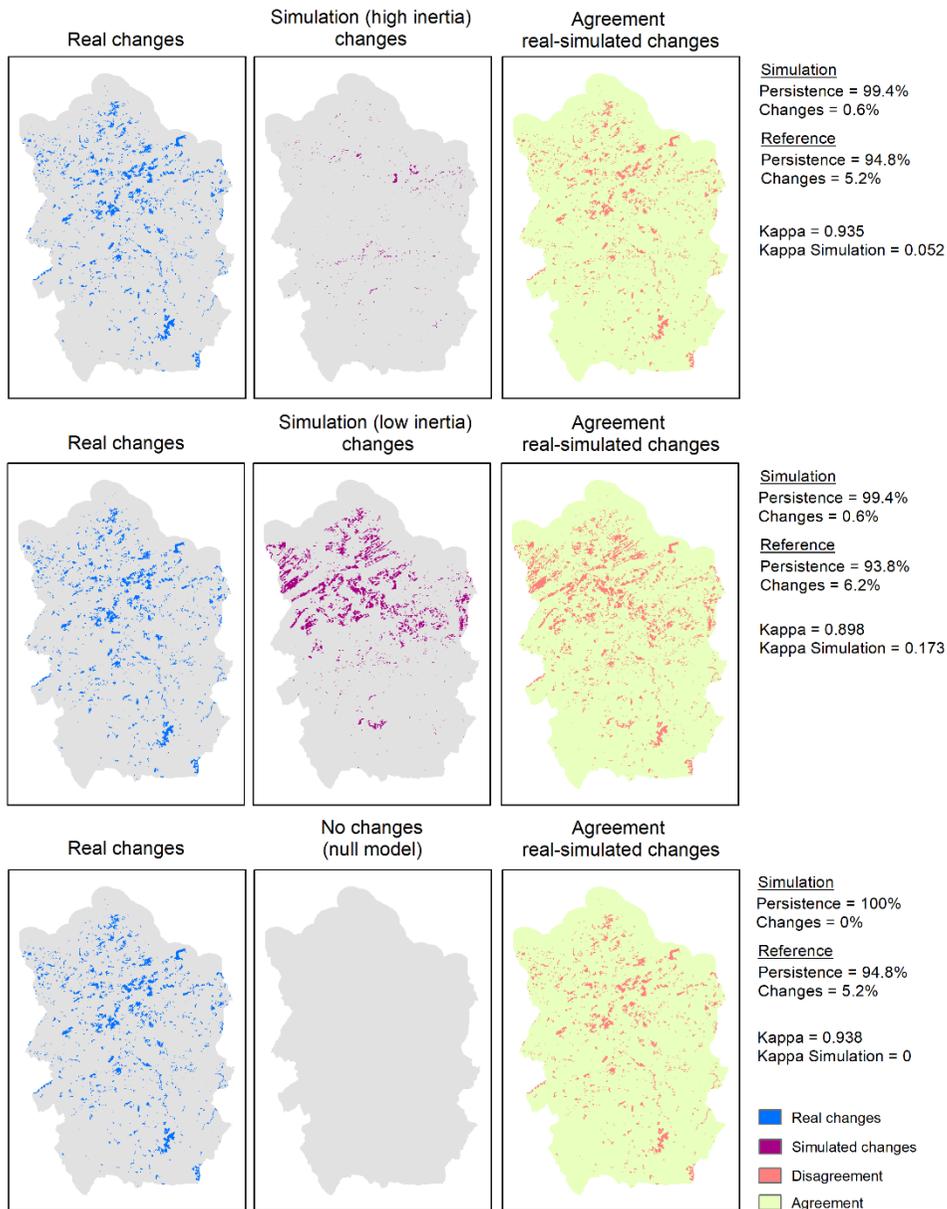


Figure 5.9. Uncertainties of the kappa validation measures according to author's view. Kappa accounts well for persistence, but not for change. Conversely, Kappa Simulation accounts well for change, but not for persistence. The null model only accounts for persistence, serving as reference.

In many cases, uncertainty or accuracy measures are provided for the whole dataset or analysis. However, these uncertainties can be different depending on the area or component considered. For data, uncertainties are usually contrasted between areas or, in the case of categorical data, between classes (Castilla and Hay 2007). Therefore, scale also

plays a key role in the study of those uncertainties. For specific analysis, as LUCCM, some of the components can gather most of the uncertainty.

While there are a great deal of methods for the validation of those aspects of the analysis which are quantifiable or more evident (Paegelow et al. 2014), as the final results, there is less research about those qualitative uncertainties, regarding the problem conceptualization (Van Asselt 2000) or the role of the user knowledge and perspectives (Brown 2004). Nevertheless, when validating, the user must acknowledge that perfect validation is usually an utopia, especially for some analysis, as LUCCM, due to the inherent uncertainty of the complex systems which LUCC models try to replicate (Van Asselt 2000).

5.4.6. PROCESS VARIABILITY AND COMMUNICATION OF RESULTS

Regarding the epistemic uncertainty, we cannot know how the system or processes studied will evolve in the future (Fig. 5.10). This evolution will depend on a wide variety of factors, as environmental, socioeconomic or political ones, whose behaviour we cannot know with certainty in advance.

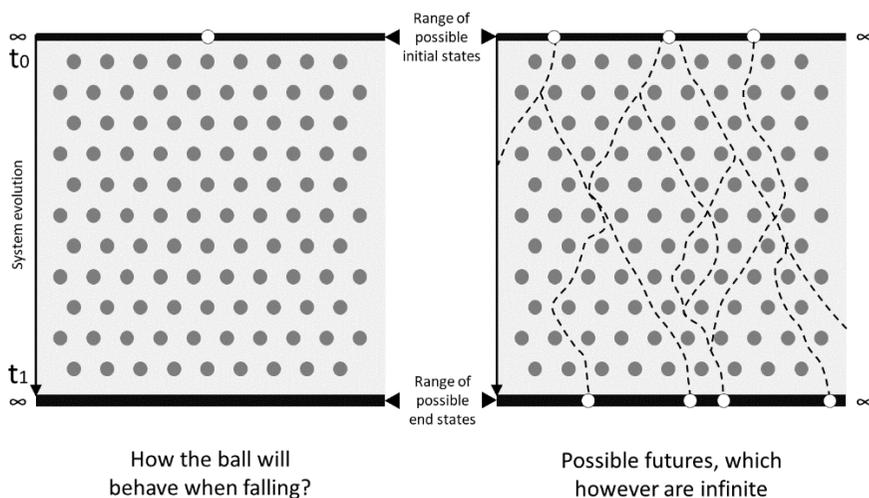


Figure 5.10. Author's view on the different ways a system can evolve in the future. Like a ball when falling through a labyrinth, we cannot be sure about the circumstances that the process will face. The end state of the system will depend on those, but also on its initial state, as the ball in our example.

Accounting for this uncertainty is one of the main challenges, since we are not aware about all the possibilities of change that the analysed system can experience. In this regard, it is useful referring to the known unknowns and the unknown unknowns, that is, those issues that we know that we cannot know, but also those ones that we don't even know that we don't know (Recker 2015). Keeping in mind these ideas helps with the dealing and recognition of this uncertainty.

When communicating the results of a LUCC model, accounting for those possible system evolutions is essential to transmit to the audience one of the main uncertainties of the results our analysis. In this regard, how we communicate these also introduce important uncertainties that must be conveniently addressed.

In the same manner we simplify the real world to represent it through data and geospatial tools, when we communicate the results of our analysis, we also simplify the outputs. If our analysis is stochastic, we must communicate how this stochasticity has affected the results (Fig. 5.11). In a similar vein, if the obtained maps are too much detailed as to be represented without any modifications, information about differences between maps showed and maps actually obtained should be provided.

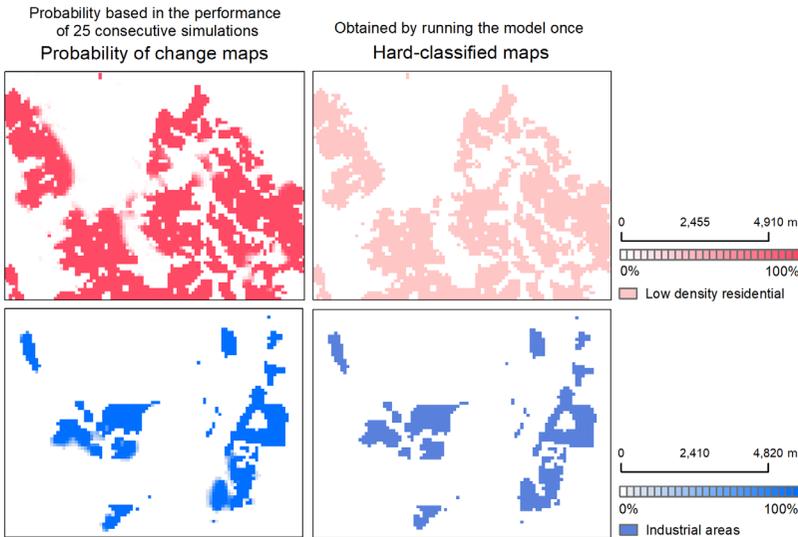


Figure 5.11. Two different ways of communicating LUCCM results, which are especially contrasted in the case of high stochastic models, unlike the example included here. It shows part of the results of a model for the Great Sydney Area set up by the author

5.5. HOW DEALING WITH UNCERTAINTY?

When dealing with uncertainty one must be aware that it is unavoidable. Accordingly, the user can just act to reduce it and to provide as much information as possible. For the first aim, the user must first locate and determine the extent of the uncertainty.

5.5.1. TRANSPARENCY AND COMMUNICATION

Every analysis contains uncertainty and, consequently, all the achieved conclusions are uncertain as well. The utility of those conclusions and studies will depend on their level of uncertainty and on how the user fully understands this as well as the limitations that it imposes.

To help in the understanding of the uncertainty, providing as much information as possible about it is an essential step. As every decision that we take, from the very selection of the problem, comes with uncertainty, providing information about uncertainty means spreading all the information and details of the analysis carried out, that is, all the decisions taken and their justification. For LUCCM, problem, level of detail (spatial and thematic resolution) and software choices are basic decisions over which rely most of the uncertainty of the analysis. Therefore, appropriate justification must be given. Thus, transparency in the way the study has been carried out is a required step for communicating uncertainty.

In addition to transparency, we must provide reports and measures about uncertainties, but always warning about the limitations and own uncertainties of this information. In this regard, scale issues must be always considered when communicating this information, since uncertainty will be different depending on the area, class or component considered.

According to the public for which the analysis is intended, the language used in the communication of the uncertainty will be different, but always transparent, i.e. clear and concise. This avoids confusion, misinterpretation and lack of understanding, that is, the translational uncertainties (Van Asselt 2000). Moreover, when delivering this information, it must be clearly hierarchized in order to get the audience interest. A summary of the most important uncertainties should be first presented, going from there into the details. This strategy, which has been called “progressive disclosure of information” (Kloprogge et al. 2007), favours audience attention and, ergo, audience awareness.

According to the previous ideas, when delivering conclusions that will be the base for decision-making process, giving information about the uncertainty of the possible decisions that will be taken is important as well. That is, providing the trust interval over which the results and conclusions could be used to take decisions. In this regard, Openshaw (1989) stated that they are not as needed estimations of error as the certainty that the error is not as high as to put in doubt the validity of the achieved results or, in this case, the validity of the taken decisions. In a similar vein, Brown (2004) talks about educating uncertainty in the decision-making process and Hunter (1999) points out the need of knowing the uncertainty of data and analysis from a legal point of view.

5.5.2. METHODS AND STRATEGIES

Different strategies have been laid out for dealing with uncertainty. They come from different perspectives in the uncertainty management, which go from positivism (uncertainty can be studied objectively) to constructivism (uncertainty always depend on the context the analysis has been carried out, including an important subjectivity) (Wardekker et al. 2008). The positivist perspective has dominated most of the uncertainty research

Table 5.1. Common procedures for uncertainty analysis in modelling environments. Quantitative (QN) and qualitative (QL) approaches

Method	Description	Studied uncertainties
Expert elicitation (QN/QL)	Collection of expert opinions through an established method about one of several aspects of the performed analysis to account for the analysis uncertainty	Very flexible approach. Most of the uncertainties
Model comparison (QN)	Comparison of the same application over several model structures to evaluate the influence of the model structure on the achieved results	Problem conceptualization and technical uncertainties
Monte Carlo analysis (QN)	It gives output statistics from the repetition of the same analysis under random variations of input data and parameters	Data and parameter uncertainty
NUSAP (QN/QL)	It is a method that provides a comprehensive assessment of uncertainty for policy purposes. It characterizes the uncertainty according to five categories: Numeral, Unit, Spread (QN), assessment and pedigree (QL)	Data and parameter uncertainties
Participatory approaches (QL)	Accounting for the opinion of stakeholders or policy makers (practical knowledge) to study the parameters and assumptions made	Very flexible approach. Most of the uncertainties
Scenario analysis (QN/QL)	It explores the possible future states of the studied system through the consideration of different assumptions about its evolution, which translates in changes in the parameters (QN) or system trajectories (QL)	Process variability
Sensitivity analysis (QN)	It studies how changes in the parameters or the initial values of the analysis affect the outcomes	Data and parameter uncertainties
Uncertainty matrix (QL)	Identification of types and location of the analysis uncertainties	Identification of all sources of uncertainty
Validation techniques (QN/QL)	Evaluation of the agreement between the model outcome and reference data. It can comprise quantitative methods, but also expert assessment and participatory approaches	Output uncertainty

over the last decades. The main attention has focused in the quantification and reduction of uncertainty. In fact, Klir and Wierman (1999) stated that for three centuries uncertainty analysis was interpreted as probability theory.

Research community admits today the existence of qualitative and quantitative uncertainties (Warmink et al. 2010), which ergo are studied by quantitative or qualitative approaches (Van Asselt 2000). There is not a solely method that can analyse all types of uncertainty and, therefore, different approaches are needed for its complete study. Nevertheless, even in that case, a whole inventory and analysis of uncertainties is not possible. That is why every uncertainty analysis is at the same time uncertain. Thus, the study of uncertainty just offers an overview of the limitations of our analysis, arising the awareness about the possible interpretations of its conclusions.

Christian et al. (2007), Harbin and Jianguo (2006), Klir and Wierman (1999), Matott et al. (2009), Uusitalo et al. (2015) and Van Asselt (2000) give an overview of different methods and strategies for the management of uncertainty. We summarize some of the most common in the Table 5.1.

Although the quantitative approaches are the usual, we want to stress here the importance of the qualitative ones. In fact, one of the main objectives of LUCCM is assessing the possible future states of a system under different management policies. Scenario analysis provide to this end a consistent tool to deal with the future system variability. Scenarios can act as qualitative tools, as an image or representation of possible future narratives (storylines), or as quantitative ones, when those narratives are translated to parameters. Some research has gone in depth in this translation (Van Delden and Hagen-Zanker 2009). In addition, Mahmoud et al. (2009) provide a framework for the development of scenarios in environmental decision-making.

LOCATION		LEVEL			NATURE	
		Statistical uncertainty	Scenario uncertainty	Recognized ignorance	Epistemic uncertainty	Stochastic uncertainty
Context	Natural, technological, economic, social and political					
Model	Model structure					
	Technical					
Inputs	Driving forces					
	System data					
	Parameters					
	Outputs					

Figure 5.12. The uncertainty matrix. Souce: based on Walker et al. (2003)

The Uncertainty Matrix proposed by Walker et al. (2003) offers a simple and easily understandable approach for uncertainty identification. It locates the different uncertainties of an analysis, giving information about their level and nature (Fig. 5.12). It is therefore

a good tool for transmitting directly and in a summarized way all the uncertainties that an analysis conveys. The main problem of this method comes from the difficulty of individualizing every source of uncertainty, given the complex interactions between them. Warmink et al. (2010) have proposed a guideline to solve this issue, in a way that every source of uncertainty can be classified in the matrix just once.

Finally, participatory approaches, both from experts and agents, provide a useful and easy way of accounting for most of the uncertainties at the same time that the user makes the audience aware about the limitations and problems of the analysis. For LUCCM, the study developed by Hewitt et al. (2014) can be used as reference. Moreover, Reed et al. (2017) and Van Delden et al. (2011) give some useful tips and frameworks for the inclusion of participation in the analysis.

5.6. CONCLUDING REMARKS

Uncertainty, as an unavoidable attribute of any geospatial data or analysis, is a complex issue which needs special attention in order to increase the reliability of our studies Also in the search for the daily applicability of our analysis and theories in policy measures.

Although much research has been made on the topic, there are still plenty of unresolved issues which need to be addressed. It is especially important focusing on the analysis and management of qualitative uncertainties, which greatly determine the achieved results and whose communication is still a pending matter. How uncertainties are communicated is, at the same time, another key point that has not received much attention. All efforts must be put in arising the uncertainty communication awareness among the research community. Many studies are still presented today without proper information and justification of key decisions, as the resolution or extent. Just by changing this common practise we can really account for the uncertainty problem. It also would help in translating these practices to the practical works delivered by the same community.

Capítulo 6

La escala como fuente y herramienta para el manejo de la incertidumbre. Un enfoque desde la perspectiva de la modelización del cambio de usos y coberturas del suelo

6.1. INTRODUCCIÓN

Cualquier sistema real es sumamente complejo, formado por numerosos procesos y elementos que interactúan entre sí. Su conceptualización es una difícil tarea, que implica la simplificación de ese sistema, en relación con las características y elementos que se desean estudiar. La escala nos da idea de cómo se ha realizado tal simplificación. En este sentido, se puede entender como una ventana de percepción que constata las limitaciones a las cuales un fenómeno o elemento puede ser visto o estudiado (Wu y Li 2009).

Las limitaciones asociadas a esa conceptualización del sistema analizado determinan parte de la incertidumbre de nuestros estudios o análisis. De este modo, resulta prácticamente imposible llevar a cabo una perfecta representación del mundo con el que trabajamos, con lo que ésta siempre contendrá un cierto grado de incertidumbre (Longley et al. 2011; Milad et al. 2016). La escala, en tanto que herramienta que permite llevar a cabo la abstracción de los sistemas analizados, guarda estrecha relación con tal incertidumbre.

A través de este capítulo, se pretende revisar la relación entre la escala y la incertidumbre. Con tal fin, realizamos una primera aproximación al marco conceptual de la escala y sus conceptos relacionados. A continuación, se analiza el papel de la escala como fuente y herramienta para el manejo de la incertidumbre en el caso específico de la Modelización de Cambios de Usos y Coberturas del suelo (*Land Use Cover Change Modelling*, LUCCM). Finalmente, teniendo en cuenta todo lo anterior, se discute cuáles son los criterios que deben seguirse a la hora de seleccionar la escala de trabajo.

6.2. ¿QUÉ ES LA ESCALA? EL PROBLEMA DE SU DEFINICIÓN

El término escala, aunque comúnmente utilizado, ha sido inconsistentemente definido (Fassnacht et al. 2006). En este sentido, se ha señalado este término como uno confuso y cuya interpretación varía notablemente entre disciplinas (Fassnacht et al. 2006; Wainwright y Mulligan 2013), siendo común el empleo de la misma concepción de la escala dentro de cada disciplina (Quattrochi y Goodchild, 1997). Por tanto, resulta necesario especificar qué entendemos por escala en cada caso (Wu y Li, 2009; Wu, 2007). Para ello, realizamos una revisión del marco conceptual de la escala.

En primer lugar, se aborda el problema epistemológico de la conceptualización del espacio y su relación con el concepto de escala. A continuación, se revisan las diferentes acepciones del término “escala” y se propone el marco conceptual de trabajo.

6.2.1. ESPACIO Y ESCALA. EL DEBATE EPISTEMOLÓGICO

La escala queda referida al espacio. Hace referencia a la forma en la que éste es conceptualizado. Es decir, a cómo se simplifica y se abstrae, de tal manera que sea posible su estudio y análisis. Para entender qué significa la escala, necesitamos por tanto aclarar qué entendemos por espacio, concepto que ha sido también objeto de numerosas interpretaciones (Ortega Valcárcel 2000).

Ortega Valcárcel (2000) muestra en su revisión de la conceptualización geográfica del espacio la variedad de formas en las que este concepto ha sido entendido a lo largo de la historia. Tantas que fundamentalmente se caracterizan por su diversidad (Ortega Valcárcel 2000). No obstante, podemos clasificar éstas en dos grandes familias: la idea de espacio absoluto frente a la de espacio relativo, de acuerdo con la contraposición propuesta por Newton (Fig. 6.1) (Meentemeyer 1989; Marceau 1999; Couclelis 2005). Thill (2011) realiza una profusa a la par que sintética caracterización de cada uno de ellos.

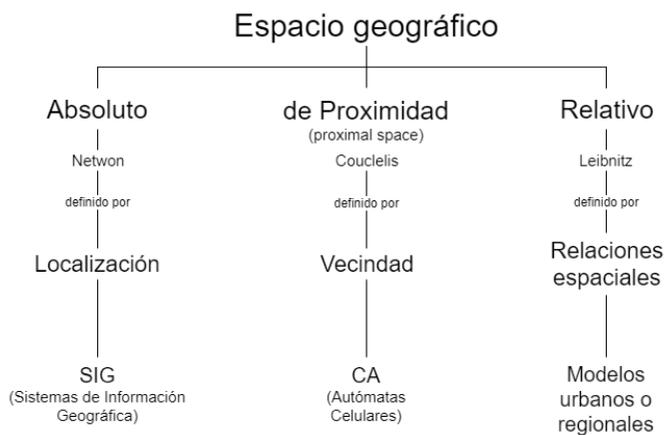


Figura 6.1. Diferentes conceptos del espacio geográfico. Los modelos urbanos o regionales hacen referencia a aquellos modelos que explican el funcionamiento de ciertos sistemas espaciales, no sólo a partir de la localización de cada uno de sus elementos, sino especialmente como consecuencia de la relación entre éstos. Fuente: basado en Couclelis (1997)

El espacio absoluto es el espacio objetivo, el espacio como contenedor, como materialidad sobre la que se ubican los diferentes elementos y procesos (Ortega Valcárcel 2000). Existe por sí mismo y puede ser representado geoméricamente, a través de una matriz tridimensional, de acuerdo con la idea griega de espacio euclidiano, en el que las distancias son objetivas y pueden ser medidas (Couclelis 2005).

En el espacio relativo, al contrario, el espacio no existe per se, sino que lo hace en relación a las entidades y procesos que operan en él (Thill 2011). El espacio no es así un continente sobre el que los diferentes elementos se ubican, sino que se forma a partir de las relaciones que entre ellos se establecen (Couclelis 2005). Las distancias, al igual que el espacio, son relativas. Dependen de las relaciones entre los elementos considerados.

En el marco de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) solemos interpretar el espacio como uno absoluto (Couclelis 2005). De hecho, asimilamos el espacio en muchas ocasiones a una matriz de datos, en dos o tres dimensiones (cuatro si añadimos la variable temporal), sobre la que los distintos procesos y elementos espaciales son representados. En tal contexto, la escala es una herramienta cuantitativa, que nos habla de la relación entre el espacio representado (matriz, mapa) y el espacio real (contenedor), interpretados ambos desde un punto de vista euclidiano y, por ende, medible y cuantificable (Meentemeyer 1989).

En otros análisis geoespaciales y, especialmente, en lo referido a la modelización, la interpretación del espacio se realiza en ocasiones en un sentido relativo. Los procesos modelados no tienen por qué operar conceptualmente en un espacio absoluto, sino que el espacio queda en ellos definido por la relación de los elementos o procesos que constituyen el sistema modelado. Tal es el caso de modelos urbanos o regionales tradicionales, como el modelo centro-periferia o el modelo gravitatorio (Couclelis 1997). Podemos citar entre ellos los modelos de interacción espacial desarrollados por Roger White (White 1977, 1978), en los que se basa el modelo regional implementado como parte de Metronamica (RIKS 2005, 2012), software de modelización utilizado en la realización de esta tesis.

Para el caso específico de los modelos de autómatas celulares (CA), Couclelis (1997) propone el espacio de proximidad (*proximal space*), como uno intermedio entre las ideas de espacio absoluto y relativo (Fig. 6.1). Este concepto de espacio no centra su atención únicamente en la localización absoluta de objetos o entidades (espacio absoluto), ni tampoco en la relación espacial entre ellos (espacio relativo). La atención se centra en la idea de vecindad, y en cómo el estado de un determinado elemento depende de sí mismo, pero, sobre todo, de sus elementos vecinos. En esta nueva conceptualización del espacio, la escala se conceptualiza también de manera diferente.

Por tanto, en la LUCCM la escala se interpreta de manera distinta según el concepto de espacio manejado. De proximidad, en relación con la conceptualización del espacio en los modelos CA; espacio relativo, en relación a la conceptualización de ciertos sistemas a partir de las relaciones entre sus componentes; y espacio absoluto, vinculado a los datos geoespaciales empleados por los modelos, y su gestión y transformación mediante SIG.

6.2.2. LAS DISTINTAS ACEPCIONES DEL TÉRMINO “ESCALA”

Si bien existen numerosas definiciones de la palabra escala, destacamos en primer lugar aquellas definiciones más genéricas que, por su poca concreción, sirven como concepto aglutinador. Permiten dar una definición única de la escala que cubre la mayor parte de los aspectos a los que la literatura se puede referir cuando hace uso de este término.

Además, pueden ser aplicadas a cualquiera de los tres espacios sobre los que opera la escala (absoluto, relativo o de proximidad).

Wu y Li (2009) definen la escala como una ventana de percepción que refleja las limitaciones con las que un determinado fenómeno puede ser visto. Bailey (1985) habla del nivel de detalle percibido cuando se refiere a la escala. Por su parte, Marceau (1999) entiende la escala como un continuo a través del cual entidades, patrones y procesos espaciales pueden ser observados y relacionados. En tal contexto, la selección de una escala específica se asemeja a la elección de un umbral, que representa uno de los múltiples niveles de organización de un sistema jerárquico. También Marceau (1999), al igual que Samat (2006) y Ruíz Rivera y Galicia Sarmiento (2016), define la escala como las dimensiones espaciales a las cuales entidades patrones y procesos pueden ser observados y estudiados, si bien Lesschen et al. (2005), Gibson et al. (2000) y Van Delden et al. (2011b) hablan también de otras dimensiones, como la temporal, cuantitativa o analítica.

Sin embargo, en los análisis geoespaciales, el uso efectivo del término escala difiere de esas concepciones genéricas anteriormente apuntadas. La escala es interpretada de manera menos abierta, es decir, refiriéndose a elementos más concretos. Éstos varían según la disciplina. En la ecología del paisaje, la escala se ha definido habitualmente a partir de dos elementos fundamentales: el detalle (*grain*), en relación con el concepto de resolución, y el tamaño o dimensión del área de estudio (*extent*) (Kok y Veldkamp, 2001; Ruíz Rivera y Galicia Sarmiento, 2016; Verburg et al., 2004). En la geografía, domina el concepto de la escala como escala cartográfica, es decir, como la relación entre el tamaño de los elementos sobre un mapa y su tamaño real (Dungan et al. 2002). Se asume así el concepto de la escala propio de la cartografía, que es el que se ha trasladado al caso de los SIG. Tanto en la ecología como en la geografía domina, por tanto, la concepción absoluta del espacio. No obstante, sí existen otras ramas de la geografía, como la humana, que han adoptado una concepción relativa del espacio (Sayre 2005).

Intentando dar luz a esta variedad de significados del mismo término, varios autores han propuesto marcos conceptuales bastante amplios que desgranar las distintas formas en las que la escala puede ser entendida (Gibson et al., 2000; Lloyd, 2014; Marceau, 1999; O'Sullivan y Perry, 2013; Tate y Atkinson, 2001; Wainwright y Mulligan, 2013). En la mayor parte de los casos, la atención se centra en la dimensión espacial de la escala. Además, muchos autores solo evalúan la escala con relación a un espacio absoluto. Resulta interesante en este sentido la definición de escala absoluta y relativa propuesta por Gibson et al. (2000). Mientras que la escala absoluta mide algún tipo de magnitud, ya sea una distancia, tiempo o cantidad, la escala relativa describe la relación funcional que existe entre un objeto o proceso con otro.

El caso de los análisis geoespaciales y, en general, de la Ciencia de la Información Geográfica, la definición de la escala ha asimilado el enfoque tradicionalmente adoptado por la ecología del paisaje. De este modo, si bien se suele hacer referencia a la problemática de la definición de la escala, e incluso se mencionan varias de sus acepciones, el entendimiento práctico de la escala se suele reducir a su conceptualización como extensión,

detalle (*grain* or *resolution*) o ambas (Lloyd, 2014; O’Sullivan y Perry, 2013). Se emplea así siempre una concepción de la escala referida al espacio absoluto o euclidiano y, por tanto, medible. Por cuanto es la concepción de la escala más comúnmente utilizada en los estudios que evalúan la influencia e impacto de ésta en la LUCCM, hacemos especial énfasis en el desarrollo de la misma.

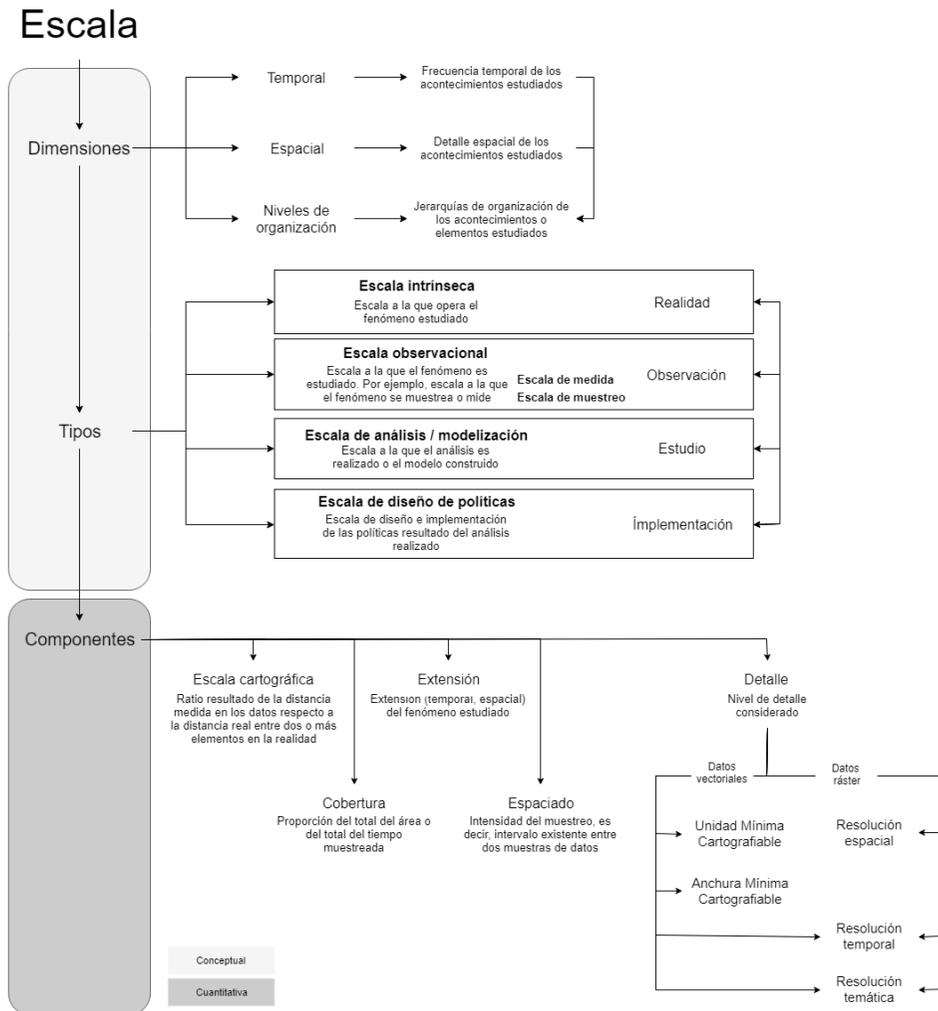


Figura 6.2. Marco conceptual de la escala y sus distintas acepciones. Fuente: basado en Wu (2007) y Wu y Harbin (2006a)

6.2.3. LOS TRES NIVELES DE LA ESCALA: DIMENSIONES, TIPOS Y COMPONENTES

Para este capítulo hemos decidido tomar como referencia el marco conceptual propuesto por Wu (2007) y Wu y Harbin (2006a), que distingue entre dimensiones, tipos y componentes de la escala (Fig. 6.2). Se trata del marco conceptual más completo de los revisados. Además, ya ha sido aplicado al caso de la LUCCM (Van Schrojenstein Lantman et al. 2011). No obstante, procede del campo de la ecología y, por tanto, queda marcado por los sesgos con los que la escala es tratada en esta disciplina.

6.2.3.1. Las dimensiones de la escala

Tres son las dimensiones en las que la escala puede ser considerada: en relación con el tiempo, el espacio y, fruto de la combinación de las dos dimensiones anteriores, en relación con el nivel de organización de los sistemas (Fig. 6.3). Van Schrojenstein Lantman et al. (2011) se refieren a esta última dimensión como la dimensión institucional.

En lo que se refiere a la dimensión temporal, todo fenómeno estudiado posee un determinado dinamismo en el tiempo, que va desde aquellos procesos que son prácticamente estáticos, hasta los que cambian de manera constante. Desde el punto de vista espacial, esos fenómenos se comportan de manera distinta sobre el espacio. A cada nivel espacial y temporal, los elementos de un sistema se relacionan entre sí de manera específica, dando lugar a distintos niveles de organización. Cada uno de ellos se encuentra caracterizado por unos procesos y patrones particulares. Van Schrojenstein Lantman et al. (2011) asocian estos niveles de organización, es decir, esta dimensión de la escala, con las diferentes instituciones que gobiernan el territorio, como puede ser el caso del gobierno de un país o un ayuntamiento a nivel local.

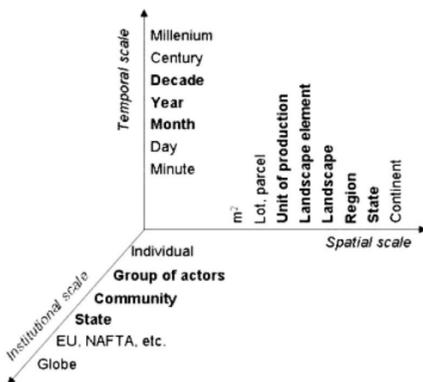


Figura 6.3. Las tres dimensiones de la escala, indicando para cada una un rango de posibles niveles de análisis. Fuente: tomado de Bürgi et al. (2005)

6.2.3.2. Los tipos de escala

Dentro de cada dimensión, distinguimos diferentes tipos de escalas (Fig. 6.4). Todos los tipos se encuentran relacionados entre sí. En función de la escala intrínseca del fenómeno

estudiado (*intrinsic scale*), uno debe de elegir la escala de observación (*observation scale*), de análisis (*analysis / modelling scale*) y también la de implementación de las políticas resultantes (*policy scale*). En caso de contradicción entre cualquiera de estos tipos de escala, el estudio realizado puede ser poco significativo (Wu y Harbin 2006a). De esta manera, el fenómeno debe ser estudiado a la escala en la que ocurre. De lo contrario, no podremos entender ni sus componentes ni sus consecuencias sobre el espacio, en tanto estas únicamente emergerán a la escala en la que el proceso opera.

Todos los tipos de escala, al igual que las dimensiones, forman parte del proceso de conceptualización del objeto de estudio. No hablamos obligatoriamente de tipos de escala en términos cuantitativos. De esta manera, esta tipología definida por Wu (2007) y Wu y Harbin (2006a) puede aplicarse a las distintas conceptualizaciones del espacio que hemos abordado anteriormente.

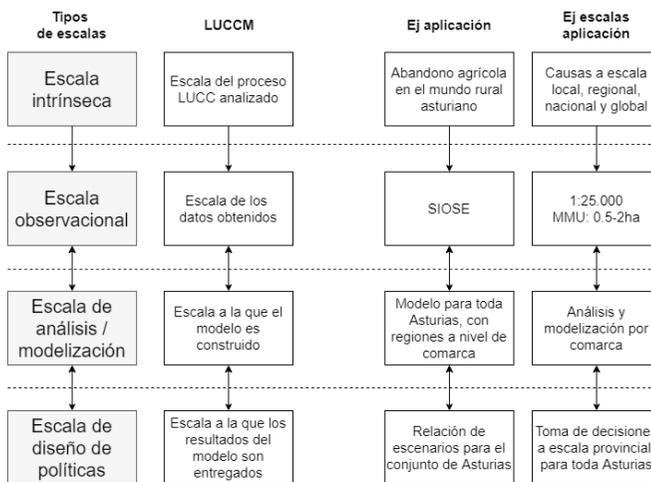


Figura 6.4. Tipos de escalas considerados en la LUCCM. Se incluye su desarrollo para el caso concreto de un ejercicio de modelización.

Fuente: basado en Van Schroyen et al. (2011).

6.2.3.3. Los componentes de la escala

Para cada tipo de escala se distinguen diferentes componentes (Fig. 6.2), los cuales son cuantificables. De este modo, a diferencia de los dos niveles anteriores (dimensiones y tipos), los componentes de la escala hacen referencia a la cuantificación de la misma. Para ello, el espacio es entendido desde una perspectiva absoluta y euclidiana.

La escala es habitualmente interpretada como alguno de estos componentes, especialmente en el caso de la ecología y la cartografía. La primera disciplina ha liderado la investigación de los efectos de la escala en los análisis espaciales (Wu 2007). Tal investigación ha adoptado un enfoque cuantitativo, a partir del estudio de la variación de los patrones estudiados según el componente de la escala analizado. De hecho, se ha tratado incluso de establecer leyes de la escala para averiguar la relación objetiva que existe entre los distintos niveles y escalas de análisis (Saura 2004; Wu 2004).

En el campo de la LUCCM, el análisis de la influencia que la escala tiene en los modelos ha tomado habitualmente el enfoque adoptado por la ecología del paisaje. De ahí

que la definición de los componentes de la escala sea un campo fundamental también para el caso de la LUCCM.

A) La escala cartográfica

Hace referencia a la relación entre el tamaño de un objeto sobre un mapa y su tamaño real sobre la superficie terrestre (Fig. 6.5). Aunque útil en términos de representación cartográfica, no es el componente de la escala más apropiado para el estudio de las relaciones escalares de patrones y procesos (Jenerette y Wu, 1997).

Mayores escalas se suelen relacionar con un mayor nivel de detalle y menores escalas con una mayor abstracción, como en el caso de la Figura 6.5. Sin embargo, esta relación no es obligatoria. Desde la aparición de los SIG, grandes variaciones en la escala cartográfica en el diseño de un mapa no tienen por qué corresponderse con cambios en el detalle de los datos originales. Estos se encuentran realizados a una escala específica. El SIG permite al usuario aplicar el zoom requerido a los datos, pudiendo el usuario, según su criterio, utilizar datos obtenidos a pequeña escala para realizar mapas de gran escala y, en principio, elevado detalle. En consecuencia, se pierde esa relación entre detalle y escala cartográfica, que impide la utilización de esta última para el estudio de las relaciones escalares. No obstante, cabe aclarar que, en tales, casos, se está haciendo un uso incorrecto de los datos, al estar estos diseñados para su utilización para una escala específica, diferente de la finalmente empleada.

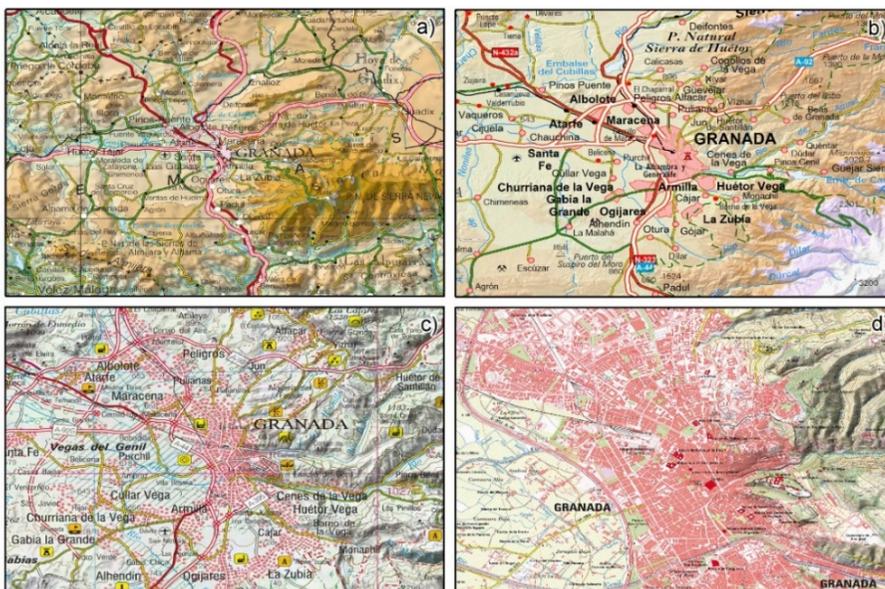


Figura 6.5. Imágenes de muestra del Mapa Topográfico Nacional (MTN), elaborado a diferentes escalas cartográficas, cada una con un distinto nivel de detalle. a) MTN 1:500.000, b) MTN 1:200.000, c) MTN 1:50.000 y d) MTN 1:25.000. Pese a la relación entre escala cartográfica y nivel de detalle, cada uno de los MTN puede ser representado mediante SIG a cualquier escala cartográfica, eliminando la relación entre detalle y escala si se desea. Fuente: Cartografías ráster (IGN)

B) La cobertura y espaciado

Los componentes cobertura (*coverage*) y espaciado (*spacing*) se relacionan con la forma en los que los datos son muestreados (Fig. 6.6). La cobertura hace referencia a la intensidad del muestreo en espacio o tiempo. Es decir, la parte total del área estudiada o del intervalo temporal analizado de la que se tienen datos. Por su parte, el espaciado se refiere a la distancia entre dos muestras adyacentes.

Ambos componentes hacen referencia a la fase de obtención de información para la elaboración de los datos espaciales. Por tanto, son de utilidad para el análisis de los efectos de la escala en la calidad y precisión de los datos, pero no para el estudio de la variación de los patrones y procesos según la escala seleccionada. Ésta suele ser elegida por el usuario. Al contrario, la cobertura y espaciado con la que han sido obtenidos los datos le son dadas al usuario, sin que éste pueda realizar modificaciones sobre ellos.

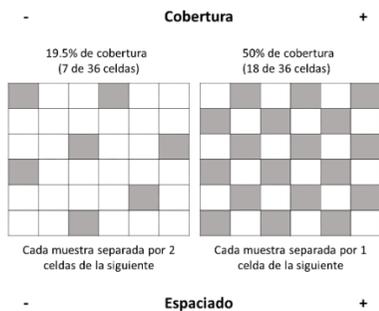


Figura 6.6. Representación de los componentes cobertura y espaciado para la dimensión espacial de la escala, en relación con la estrategia de muestreo de información. Fuente: elaboración propia

C) La extensión

La extensión (*extent*), definida también por Lam y Quattrochi (1992) como escala geográfica, se refiere a la amplitud (espacial, temporal o jerárquica, según la dimensión) con la que el fenómeno o proceso es estudiado. Desde el punto de vista espacial, podría simplemente definirse como la extensión espacial cubierta por un mapa o dato (Fig. 6.7).

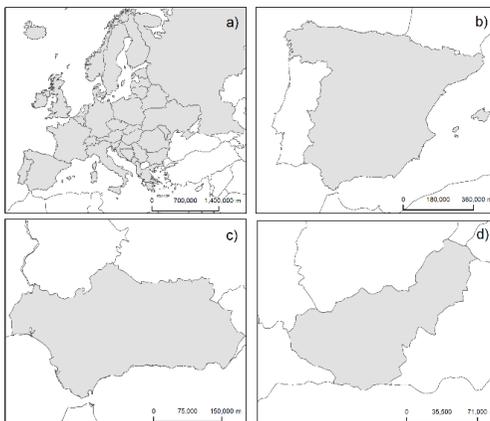


Figura 6.7. Un ejemplo de diferentes extensiones espaciales posibles para un estudio en el ámbito europeo. a) Europa, b) España, c) Andalucía, d) Granada. Fuente: Bases cartográficas del Atlas Nacional de España (IGN)

D) El detalle

Finalmente, el detalle (*grain*) hace referencia a la cantidad de información (espacial, temporal, temática...) mostrada para un mismo espacio. En función del modelo de datos empleado, ráster o vectorial, ese detalle queda definido por distintas variables.

En los datos vectoriales formados a partir de polígonos, el detalle espacial queda determinado por la unidad y anchura mínima cartografiada (Fig. 6.8), es decir, por el polígono con el área y anchura más pequeña representado (Verburg et al. 2011; García-Álvarez 2018). En los datos ráster, por el tamaño de la celda, es decir, por la resolución espacial (Fig. 6.8). Esta puede entenderse para este modelo de datos como la unidad mínima cartografiada (Pascual-Hortal y Saura, 2007), por cuanto es la unidad mínima de información que recoge la malla ráster.

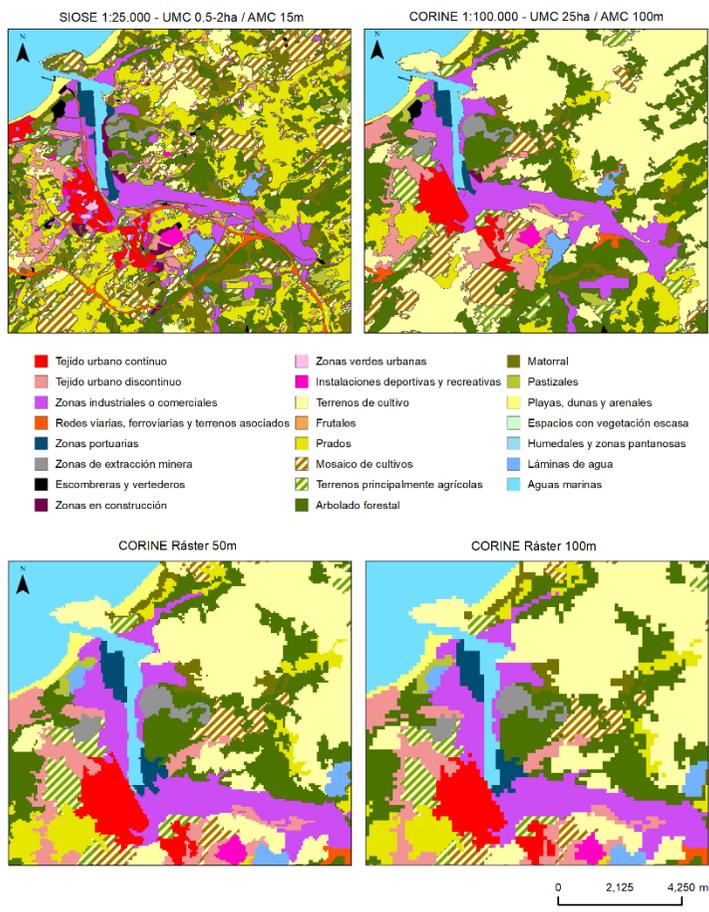


Figura 6.8. Arriba, comparación de SIOSE y CORINE Land Cover, con distintas Unidades Mínimas (UMC) y Anchuras Mínimas (AMC) Cartografiadas para el área de Avilés y su entorno (Asturias) en el año 2011. Abajo, versión rasterizada de CORINE Land Cover a dos resoluciones espaciales distintas (50 y 100m) para una parte del área representada en los dos mapas iniciales de la figura. Fuentes: CLC 2012 y SIOSE 2011 (IGN)

El detalle en términos de tiempo queda definido por la resolución temporal, es decir, por la cantidad de puntos temporales de los que se tiene información para un determinado intervalo de tiempo. Por su parte, el detalle temático depende de la resolución o escala

temática, también definida como escala categórica (Ju et al. 2005) o resolución de clase (Conway 2009). Hace referencia al detalle en la diferenciación de distintas clases en el caso de los mapas categóricos (Gounaridis y Koukoulas, 2016). A mayor resolución temática, se diferencia un mayor número de clases, que, en consecuencia, poseen una definición cada vez más detallada (Fig. 6.9).

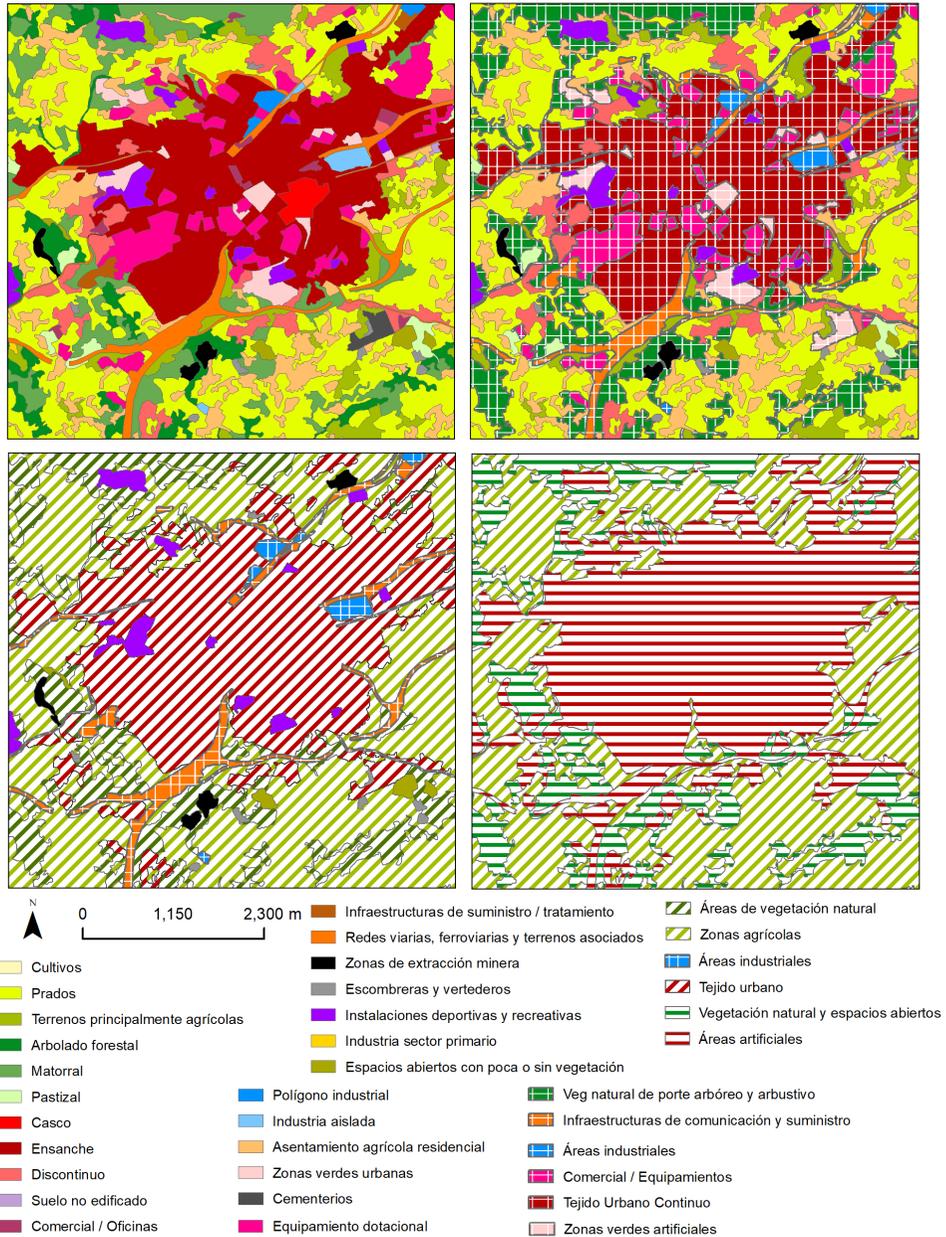


Figura 6.9. Comparación del mismo ámbito (ciudad de Oviedo y su entorno), representado de acuerdo con cuatro resoluciones temáticas diferentes para el año 2005. Fuentes: SIOSE 2005 (IGN)

6.3. ESCALA Y RELACIONES ESCALARES EN LA CIENCIA DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA. UN ENFOQUE CUANTITATIVO

6.3.1. LA CONCEPCIÓN ESCALAR DE LA REALIDAD

En los datos y análisis geoespaciales, la escala es una herramienta para el estudio de los patrones y procesos que ocurren y se manifiestan sobre el espacio. Éstos suelen ser analizados a partir de su relación con los componentes de la escala y, por tanto, adoptando una conceptualización absoluta del espacio. Tomando como referencia esta perspectiva, la habitualmente empleada en la ecología y la LUCCM, cabe aclarar los principales conceptos vinculados a la escala, que permiten entender la realidad desde un punto de vista escalar (Fig. 6.10).

La realidad y los distintos sistemas que la componen, ya sean naturales o socioeconómicos, son sistemas complejos, fruto de las interrelaciones que se dan entre los diferentes elementos y procesos a distintos niveles. Cada uno de estos niveles (*levels*) ha de entenderse como una unidad de análisis coherentemente interpretada a una escala específica (Gibson et al. 2000; Van Delden et al. 2011b). Implica así el estudio de la realidad a partir de la misma escala, la cual se corresponde con unas características particulares del sistema analizado. De este modo, a cada uno de estos niveles, fruto de la interacción de los distintos elementos y procesos que en ellos tienen lugar, se observan una serie de patrones y características específicas. Son lo que se conocen como propiedades emergentes (Gibson et al. 2000), es decir, realidades que aparecen a un nivel específico de análisis consecuencia de las particulares interacciones que a tal nivel ocurren entre los elementos y procesos del sistema analizado.

Lo anterior es consecuencia de la dependencia escalar (*scale dependence*) de esos patrones y procesos. De esta manera, la mayor parte de éstos son dependientes de la escala. Es decir, poseen un significado y características distintas a cada escala de análisis (O'Sullivan y Perry, 2013; Ruíz Rivera y Galicia Sarmiento, 2016). No obstante, sí existen patrones, los menos, que no varían con la escala, de tal manera que en ellos cada una de sus partes puede ser considerada como una reducida porción del todo (Mandelbrot 1967). Se trata de los denominados patrones *scale-invariant*, *self-similar*, *self-affine* o fractales (O'Sullivan y Perry, 2013).

En el caso de aquellos patrones y procesos dependientes de la escala (*scale-dependent*), tal dependencia se origina como consecuencia de su variación sobre el espacio u otra dimensión considerada. A medida que consideramos espacios o intervalos temporales más extensos, esos patrones son más heterogéneos, con lo que no quedan explicados por los mismos elementos que los definen localmente. Se trata de lo que Chris Lloyd (Lloyd 2014) ha denominado la *spatial scale of variation*. Se refiere a la escala a la que los elementos en una determinada dimensión (espacio, tiempo...) varían, es decir, se hacen más heterogéneos. Está en relación con la mayor heterogeneidad de los elementos sobre escalas (extensiones, *extents*) más grandes frente a escalas menores o locales. Es, al fin y al cabo,

la consecuencia de la denominada primera ley de la geografía formulada por Waldo Tobler: todo se encuentra relacionado entre sí, pero los elementos más cercanos se encuentran más relacionados que aquellos más alejados (Tobler 1970).

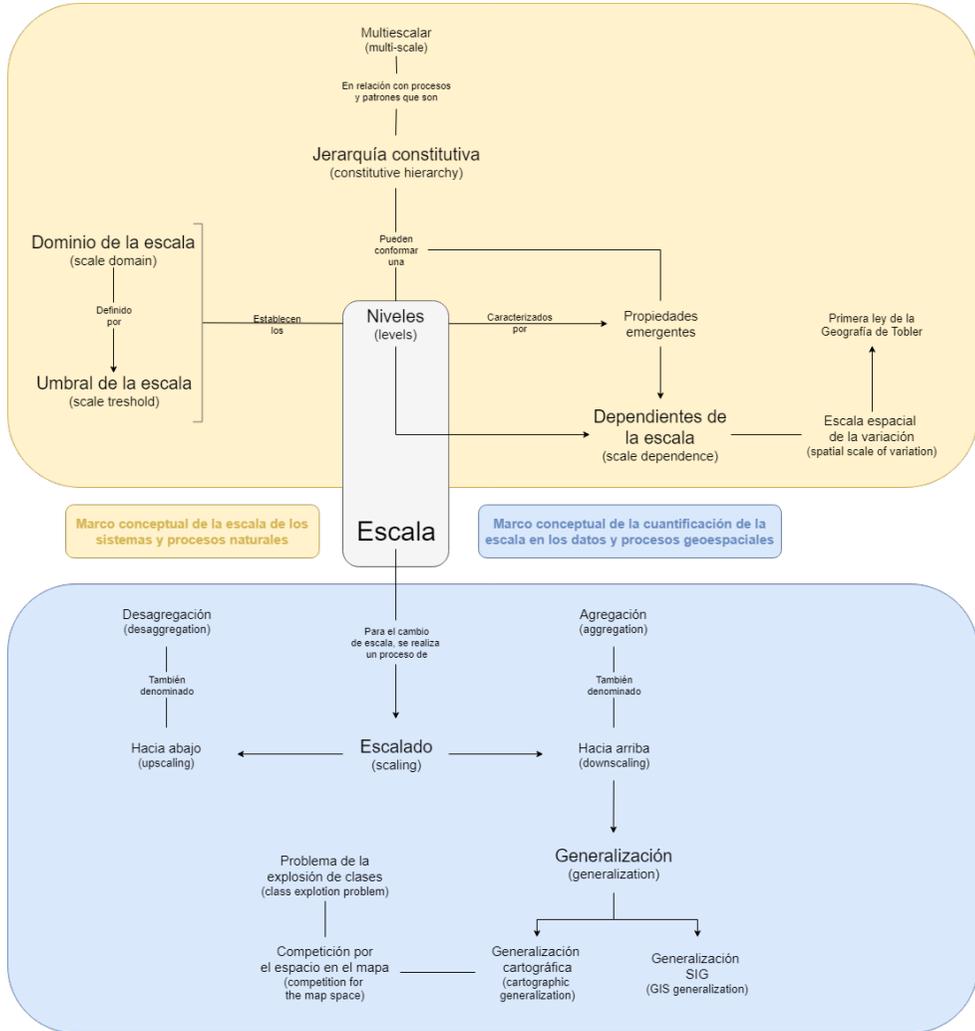


Figura 6.10. Concepción escalarse de la realidad y los datos geográficos desde una perspectiva cuantitativa. Fuente: elaboración propia

Fruto de todo lo anterior, estudiamos la realidad y sus distintos sistemas a diferentes niveles de análisis. Quedan definidos, como ya se ha apuntado, por propiedades específicas, que únicamente emergen a una determinada escala. No se trata de una escala absoluta, sino de rango sobre el que tales propiedades emergen y en el que los patrones y procesos analizados permanecen estables. Las escalas ubicadas en tal rango constituyen lo que se ha denominado el *scale domain*, que queda delimitado por los umbrales o *scale thresholds*, a partir de los cuales tales propiedades cambian (Marceau, 1999; Wu y Li, 2009).

Cuando varios niveles (*levels*) se encuentran relacionados entre sí, de tal manera que un conjunto de sistemas estudiados a un determinado nivel de análisis dan lugar a un nuevo sistema de características distintas, hablamos de la existencia de una jerarquía constitutiva (*constitutive hierarchy*) (Gibson et al. 2000). En ella, el todo no es igual a la suma de las partes. Al contrario, los elementos que constituyen el nuevo nivel de análisis conforman una nueva realidad, caracterizada por procesos y patrones específicos, que solo emergen a la escala de tal nivel. Cuando esto ocurre, hablamos de realidades o sistemas multi-escalares que, por consiguiente, para ser correctamente estudiados, deben de analizarse a diferentes escalas.

6.3.2. LAS RELACIONES ESCALARES Y SU CONCEPTUALIZACIÓN GEOESPACIAL

Lo anterior define la complejidad del análisis de los procesos y patrones espaciales. Cuando estudiados desde la perspectiva de la Ciencia de la Información Geográfica, la necesidad de entender y explicar esa realidad escalar, a distintos niveles de análisis, implica manejar los datos a diferentes escalas. Raramente contamos con datos a la escala necesaria para el nivel de análisis escogido. Tampoco suele resultar fácil coleccionar éstos de acuerdo con tal criterio. En consecuencia, es necesario adaptar la escala de los datos existentes a aquella en la que se manifiesta el proceso estudiado. Para ello realizamos los procesos de escalado (Fig. 6.10).

Se entiende como escalado (*scaling*) al procedimiento de traslación de información de una escala a otra (Wu 2007). Puede ser desde escalas de mayor detalle a otras de menor detalle (*downscaling*) o viceversa (*upscaling*) (Marceau 1999). Wu y Li (2009) hablan también de agregación y desagregación para definir los procesos de *downscaling* y *upscaling*. No obstante, esto solo es cierto en el caso de datos categóricos o continuos, por cuanto no se puede aplicar al caso de elementos lineares.

El *downscaling* puede entenderse asimismo como un proceso de generalización. Ésta se puede definir como la simplificación de los datos o procesos manejados, de tal manera que quedan representados de una forma más simple, pero sin perder la información esencial que transmiten. Johnston et al. (1999) distingue en este sentido entre generalización cartográfica y generalización SIG.

La primera hace referencia a la simplificación del detalle representado sobre un mapa para hacerlo legible. En tal contexto, sólo aquellos elementos más importantes permanecen, eliminándose el resto. Este proceso, por el que solo los elementos más significativos se mantienen en el mapa, es lo que João (2001) ha definido como la competición por el espacio en el mapa (*competition for map space*) y que Fisher (2005) ha calificado como el paradigma de la producción cartográfica. Se encuentra relacionado por el problema de la explosión de clases (*class explosion problem*) definido por Villa et al. (2008), que viene a manifestar la imposibilidad de representar toda la información de la superficie terrestre a través de una leyenda de clases, por el carácter infinito que esta debería tener. Por otro

lado, la generalización SIG hace referencia a la simplificación del análisis geoespecial consecuencia de la reducción del detalle considerado.

6.3.3. EL ESCALADO Y SUS CONSECUENCIAS

El escalado o procesamiento de los datos introduce una inevitable fuente de incertidumbre en éstos, que debe de ser correctamente estudiada (Li y Wu, 2006; Wu, 2007). Wu y Harbin (2006b) y Lloyd (2014) revisan diferentes métodos para llevar a cabo tal escalado, en la búsqueda del método más preciso y, por ende, de la menor incertidumbre.

Con un fin similar, Cao y Siu-Ngan Lam (1997), Lloyd (2014), Marceau (1999) y Samat (2006) relatan algunos de los principales métodos existentes para llevar a cabo una caracterización de los datos geoespaciales según la escala de análisis. Este paso resulta fundamental de cara a conocer los datos de trabajo y su comportamiento escalar.

El proceso de escalado introduce incertidumbre en los datos manejados, pero también en los resultados de los análisis realizados a partir de los mismos. En consecuencia, el análisis de la incertidumbre fruto del proceso de escalado no debe centrarse sólo en los datos en sí, sino también en las conclusiones que se obtienen a partir del análisis de esos datos. En este sentido, Lloyd (2014) señala que en los análisis geoespaciales la incertidumbre es, en parte, una función de la escala. En consecuencia, la significatividad e incertidumbre de los resultados de nuestros estudios dependerán de cómo de bien se encuentren estructurados los mismos, según la escala empleada.

En relación con el punto anterior, cabe hacer referencia a algunos de los principales problemas de análisis que surgen como consecuencia del escalado de los datos: el Problema de las Unidades Modificables de Análisis (*Modifiable Areal Unit Problem*, MAUP), el Problema de la Agregación de Categorías (*Category Aggregation Problem*, CAP) y las falacias de inferencia espacial (*inference fallacies*).

6.3.3.1. El Modifiable Areal Unit Problem (MAUP)

El espacio geográfico es un continuo, sin que puedan diferenciarse barreras y límites claros para algunas de sus características, como puede ser la distribución de la población o elementos físicos tales como la altitud. Sin embargo, para llevar a cabo el estudio de tales características, es necesario definir unidades de análisis. La delimitación de éstas se puede realizar según diferentes criterios, existiendo formas infinitas de hacerlo (Marceau 1999).

En el caso de datos demográficos, las unidades de análisis suelen venir determinadas por los límites administrativos utilizados por los organismos correspondientes para la colección de información. Si trabajamos con datos ráster, la resolución de la malla ráster, es decir, el tamaño de la celda empleada, puede considerarse también una unidad de análisis. De este modo, las unidades de análisis son a menudo delimitadas de acuerdo a criterios operacionales (facilidad de cálculo del modelo de datos ráster o posibilidad de coleccionar información demográfica a partir de una administración pública), en vez de geográficos. Estas unidades de análisis no tienen por qué corresponderse con las unidades a

las que un fenómeno puede ser estudiado, en relación con sus propiedades emergentes y la escala espacial de su variación (*spatial scale of variation*).

La forma en la que las unidades de análisis son definidas puede tener importantes consecuencias en nuestros estudios. Es lo que Openshaw y Taylor (1979) denominaron el Problema de las Unidades Modificables de Análisis (*Modifiable Areal Unit Problem*, MAUP). Éste consta de dos componentes principales: el problema de la escala (*scale problem*) y el problema de la agregación o zonificación (*aggregation o zoning problem*) (Fig. 6.11) (Marceau 1999; Wong 2009).

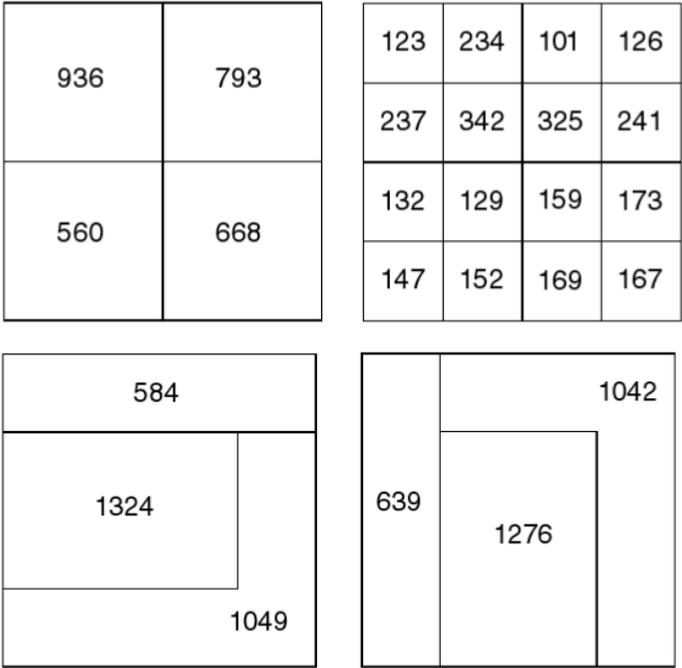


Figura 6.11. Representación gráfica del problema de la escala (arriba) y del problema de la agregación o zonificación (abajo). Ambos constituyen el Problema de las Unidades Modificables de Análisis (*Modifiable Areal Unit Problem*, MAUP). Fuente: tomado de Lloyd (2014)

El *scale problem* se refiere a la variación de los resultados de un estudio consecuencia de la sucesiva agregación de las unidades de análisis en otras unidades de mayor dimensión. Por su parte, el *aggregation o zoning problem* hace referencia a cómo los resultados de un estudio pueden variar consecuencia de la delimitación de la misma área a una misma resolución a partir de diferentes criterios, es decir, de manera distinta.

El problema de la escala (*scale problema*) entra en relación con el concepto de jerarquías constitutivas anteriormente descrito. El todo no tiene por qué ser igual a la suma de las partes, de tal manera que de la agregación de éstas emergen nuevas propiedades que nos permiten estudiar procesos y patrones distintos. Un estudio realizado a ambos niveles puede arrojar conclusiones distintas, incluso aunque se parta de los mismos datos.

Numerosos autores han propuesto y revisado distintos métodos para evaluar las consecuencias del MAUP en los datos, así como para reducir e incluso evitar tal problemática (Marceau 1999; Lloyd 2014). Wong (2009) proporciona una interesante revisión de tales esfuerzos. No obstante, el MAUP aún se sigue considerando como una de las principales limitaciones de los análisis geoespaciales (Schmit et al. 2006), si bien en algunos casos, al igual que la escala, se considera como una herramienta para una adecuada comprensión de los sistemas multiescalares o jerárquicos, que presentan diferentes características o propiedades a cada nivel de análisis (Quattrochi y Goodchild, 1997; Wu, 2007).

6.3.3.2. El Category Aggregation Problem (CAP)

En relación a la problemática del escalado (*downscaling*) de datos categóricos, Pontius Jr. y Malizia (2004) formularon el Problema de la Agregación de Categorías (*Category Aggregation Problem*, CAP). Éste viene a hacer referencia a las importantes consecuencias que la agrupación de la leyenda temática de una variable categórica puede tener en los resultados del análisis del dinamismo temporal de esta variable.

Difiere el CAP del MAUP en el elemento del análisis que se modifica: mientras en el MAUP se modifica la unidad de observación o análisis, en el CAP lo hace la definición de la variable analizada (Pontius Jr. y Malizia, 2004). Cuando la variable que se analiza no son las propias categorías en sí, como es el caso del estudio de su dinamismo temporal (se evalúan las interacciones entre esas categorías), las consecuencias que su agregación tiene en el análisis no quedan únicamente definidas por la teoría que guía el MAUP.

Pontius Jr. y Malizia (2004) definieron cinco principios básicos que determinan los efectos que la agregación de las clases tiene sobre el análisis de los cambios de esas clases en una serie temporal. Para ello distinguen entre cambio neto (total ganancias - total pérdidas) e intercambio (ganancias entre dos categorías - pérdidas entre dos categorías). De esta manera, según la importancia del cambio neto (ganancias, pérdidas, sin cambio) e intercambio (ganancias, pérdidas, sin cambio) de las categorías que se agregan, el cambio neto e intercambio total detectados en el mapa agregado variarán.

6.3.3.3. Las falacias de inferencia espacial (*inference fallacies*)

El MAUP revela cómo los resultados de un estudio pueden variar según la unidad de análisis considerada. Cuando las consecuencias del MAUP son obviadas, y conclusiones o inferencias alcanzadas a un nivel de análisis son trasladadas a otro nivel de análisis distinto, se incurre en las denominadas falacias de inferencia espacial (Fernández y Wu, 2016; Ruíz Rivera y Galicia Sarmiento, 2016). De este modo, a cada nivel de análisis emergen unas propiedades específicas, es decir, una serie de procesos y patrones nuevos, que sólo pueden ser estudiados a tal nivel. Las conclusiones alcanzadas de su análisis no pueden ser trasladadas a otros niveles si los procesos o patrones de estudio, como es habitual, son dependientes de la escala (*scale dependent*) (Fig. 6.12).

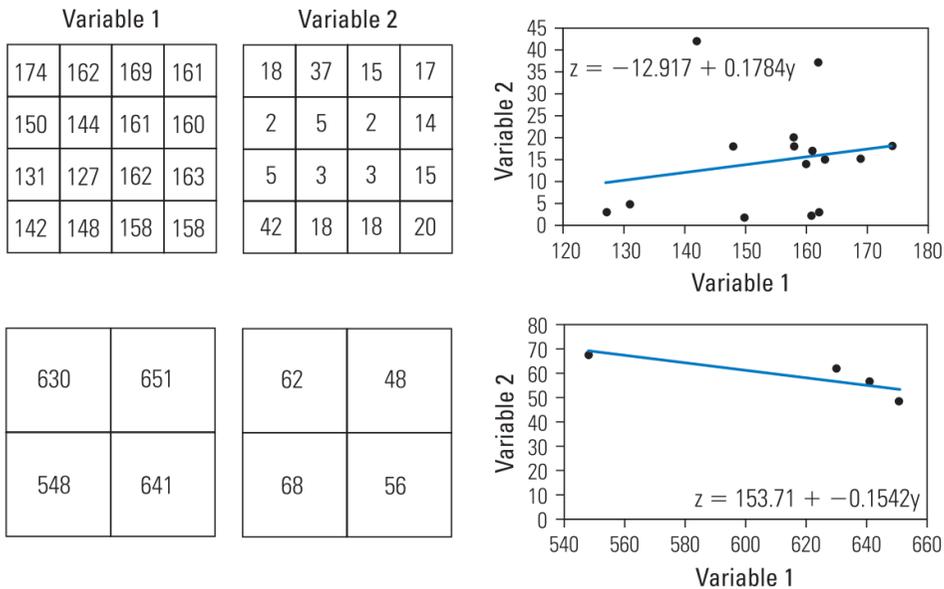


Figura 6.12. Ejemplo práctico de los resultados de una regresión lineal simple entre dos variables. A cada nivel de agregación, los resultados del análisis son diferentes e, incluso, contrastados. Por tanto, de usar las conclusiones alcanzadas a un nivel de análisis para explicar las relaciones existentes en otro, el usuario incurriría en las falacias de la inferencia espacial. Fuente: tomado de Lloyd (2010)

Cuando relaciones existentes a un nivel de menor detalle son atribuidas a niveles de mayor detalle, se incurre en la denominada falacia ecológica (*ecological fallacy*), también denominada problema de la inferencia ecológica (*ecological inference problem*) (Pontius Jr. y Malizia, 2004). Fue inicialmente identificada por Robinson (1950). Wu (2004) critica el término *ecological fallacy* por confuso. El adjetivo “ecológica” hace referencia en este contexto a la existencia de grupos o agregados, y no a la interrelación entre los organismos y el medio ambiente (Wu 2007). Considera así Wu que el uso de tal adjetivo adolece de rigor científico y, en su lugar, propone el término “transmutación espacial” (*spatial transmutation*), con lo que el problema quedaría definido como la *spatial transmutation fallacy* (Wu 2007).

A la falacia ecológica identificada por Robinson (1950), Alker (1969) sumó dos nuevos tipos: la falacia individualista (*individualistic fallacy*) y las falacias de niveles cruzados (*cross-level fallacies*). La primera, también denominada *atomistic fallacy* (Lloyd 2014), hace referencia a la situación contraria a la planteada por la falacia ecológica: lo erróneo de inferir relaciones a niveles agregados, de menor detalle, a partir de las relaciones existentes a niveles desagregados, de mayor detalle. Por su parte, las *cross-level fallacies* se refieren a la falsedad de inferir relaciones de un subgrupo de datos a partir de otro subgrupo de datos al mismo nivel de análisis (Cao y Siu-Ngan Lam, 1997).

Diferentes métodos han sido propuestos para el control de estas falacias, si bien se considera a las mismas como inevitables (Wu 2007). Además, aún se señala como escasa

la investigación de los efectos y consecuencias que tanto el MAUP como las falacias de inferencia espacial tienen sobre los análisis geoespaciales (Goodchild, 2011; Pontius Jr. y Malizia, 2004).

6.4. LA ESCALA EN LA MODELIZACIÓN DEL CAMBIO DE USOS Y COBERTURAS DEL SUELO

La modelización, al igual que cualquier dato o proceso geoespacial, supone la simplificación de un sistema real, de tal forma que su análisis y representación es factible (Gómez Delgado y Bosque Sendra, 2004). Tal simplificación lleva asociada un grado de incertidumbre (Li y Wu, 2006), que guarda estrecha relación con la escala, entendida como sinónimo del grado de abstracción alcanzado.

La escala implica, por tanto, incertidumbre: la incertidumbre asociada a la diferencia entre el sistema conceptualizado y su funcionamiento real. Sin embargo, por cuanto esta es inevitable, también podemos entender a la escala como una herramienta para el manejo de esa incertidumbre. Es decir, como un mecanismo que nos posibilita entender los distintos niveles de organización de un sistema desde un punto de vista analítico, permitiendo ver el detalle cuando éste es el objeto de estudio, y eliminando el mismo cuando solo queremos analizar rasgos o tendencias generales de los datos (Ruíz Rivera y Galicia Sarmiento, 2016; Verburg et al., 2003).

Entendemos así la escala como una fuente y herramienta para el manejo de la incertidumbre. Con tal perspectiva, en las siguientes líneas se analiza la relación entre escala e incertidumbre en la Modelización del Cambio de Usos y Coberturas del suelo (*Land Use Cover Change Modelling*, LUCCM). Esta revisión se ha realizado de acuerdo con la literatura académica existente al respecto. Si bien amplia y en crecimiento, aún presenta campos poco explorados y son muchos los autores que han planteado la necesidad de seguir investigando en tal dirección (Herold et al. 2005; Van Schrojenstein Lantman et al. 2011; Brown et al. 2013; National Research Council 2014; Blanchard et al. 2015; Van Vliet et al. 2016).

6.4.1. LA CONCEPTUALIZACIÓN DEL OBJETO DE ESTUDIO

6.4.1.1. La delimitación del objeto de estudio

Uno de los primeros pasos a la hora de realizar cualquier análisis geoespacial y, en concreto, un ejercicio de modelización, pasa por la delimitación del objeto de estudio. Ésta debe de realizarse teniendo en cuenta los límites sobre los que opera el fenómeno estudiado. De este modo, tales límites, tanto espaciales como temporales, deben de definir un objeto de estudio lo más autónomo o cerrado posible.

El modelo no será capaz de tener en cuenta factores externos a tales límites y, por consiguiente, la incertidumbre del modelo será tanto más importante como sea el poder

explicativo de esos factores externos al objeto delimitado en el comportamiento del sistema modelado. Además, en función de los límites escogidos, los procesos que pueden ser explicados y las variables que explican los mismos serán distintas (Fig. 6.13).

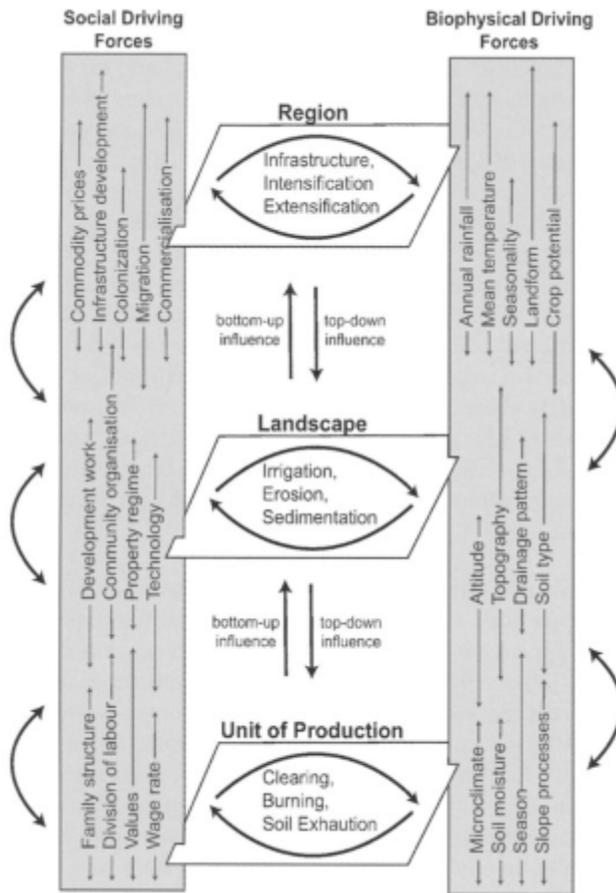


Figura 6.13. Ejemplo de diferentes procesos que pueden ser estudiados a distintas escalas, explicados a partir de diferentes variables independientes. Fuente: tomado de Verburg et al. (2003)

Existen pocos estudios que hayan analizado la influencia de la componente extensión (*extent*) espacial de la escala en la modelización LUCC. Verburg y Veldkamp (2004) compararon dos aplicaciones LUCCM a dos escalas (*extents*) diferentes: una nacional y otra regional/local. Cada aplicación fue calibrada con datos específicos y a distinto nivel de detalle. Los resultados fueron así diferentes, pero complementarios. De este modo, cada aplicación reveló procesos y patrones distintos, en relación con cada nivel de análisis y las propiedades emergentes de cada uno de ellos. Parecidos análisis de Veldkamp et al. (2001) y Verburg y Chen (2000) revelan como el poder explicativo de una serie de variables es diferente según la extensión del área analizada. Por su parte, Kok y Veldkamp (2001) realizaron el mismo ejercicio de modelización a dos escalas (*extents*) diferentes, observando diferencias muy notables en los resultados conseguidos, mucho mayores a las provocadas por el cambio de la resolución espacial de los datos empleados. Para el

caso de modelos CA, Pan et al. (2010) han comprobado como pequeños cambios en la variación de la extensión del área de estudio afectan a los resultados del modelo. De esta forma, si bien parece que escalas (*extents*) muy distintas dan lugar a modelos complementarios y con diferente poder explicativo, el estudio de la influencia del *extent* para modelos LUCC a similares escalas se erige como una importante necesidad de investigación.

Los efectos de la dimensión temporal del componente *extent* de la escala han sido más estudiados para el caso de la LUCCM. Se encuentran relacionados con la disponibilidad de series temporales de datos. De este modo, éstas suelen ser incompletas o inconsistentes (Van Schrojenstein Lantman et al. 2011), lo que dificulta los ejercicios de modelización, por cuando éstos suelen basar sus calibración y validación en los procesos y patrones revelados por los datos (Mas et al. 2018; Paegelow et al. 2018).

Paegelow (2018a) y Rosa et al. (2015) han demostrado la influencia que tiene la elección del intervalo temporal de calibración del modelo sobre el cálculo de las cantidades de cambio, así como sobre los procesos y patrones observados. Camacho Olmedo (2018) ha comprobado como, para el caso de las variables basadas en transiciones, el intervalo temporal seleccionado para la creación de las variables independientes de un modelo varía notablemente la información mostrada por éstas. Por su parte, Verburg et al. (2004b) revelan las diferentes relaciones de vecindad entre usos y coberturas del suelo en función del periodo considerado. De este modo, las dinámicas de cambio de los usos y coberturas del suelo pueden variar con el tiempo. Delimitar temporalmente el objeto de estudio de acuerdo con aquel periodo en el que los procesos de cambio coinciden con los actuales es así un paso esencial de cara a conseguir un adecuado funcionamiento del modelo.

De igual forma, a la hora de extrapolar los procesos interpretados por el modelo a futuro, la extensión temporal de la simulación debe de estar en relación con el periodo de calibración. En este sentido, se ha demostrado que cortos periodos de simulación funcionan mejor para el caso de modelos con cortos periodos de calibración (Clarke 2004; Rosa et al. 2015). La escasa disponibilidad de datos para largos periodos de tiempo (Verburg et al. 2011) así como la variabilidad de los procesos y patrones de cambio, hacen que usualmente los intervalos de simulación sean reducidos (Camacho Olmedo et al. 2018). Se debe esto a las importantes incertidumbres asociadas a largos periodos de simulación, para los que no existe la seguridad del mantenimiento de las relaciones interpretadas de acuerdo con los datos disponibles.

6.4.1.2. Las unidades de análisis

Vinculado al MAUP, cuando se realiza un ejercicio de modelización LUCC es necesario definir la tipología de las unidades de análisis, tanto en la dimensión espacial, como en la temporal y de organización jerárquica del sistema. Se trata de las unidades sobre las que el modelo actúa y que, por tanto, tienen una importancia trascendental en los resultados del mismo. Derivan de la forma en la que el sistema es conceptualizado.

A) La dimensión temporal

En lo referido a la dimensión temporal, Kim (2013) y Yeh y Li (2006) han demostrado cómo la forma en la que el tiempo es discretizado en un modelo de autómatas celulares influye en los resultados simulados por el mismo. El comportamiento del modelo no es igual cuando actúa a intervalos anuales, que cuando lo hace cada mes o cada década. Del mismo modo, a la hora de determinar las reglas de vecindad en un modelo CA Bernard et al. (2008) señalan como el incremento de la resolución temporal del análisis se salda en unas reglas más realistas. Por tanto, la resolución temporal a la que actúa el modelo o a la que éste es calibrado puede determinar los resultados del mismo y, en consecuencia, debe de ser convenientemente elegida. Van Schrojenstein Lantman et al. (2011) aportan algunos consejos a la hora de tomar esta decisión.

Muchas de las variables empleadas en modelos LULC son interpretadas de manera estática, de tal manera que su influencia en el proceso modelado permanece invariable con el tiempo. Rosa et al. (2015) alertan sobre los posibles problemas conceptuales que tal decisión puede acarrear, mientras que Houet et al. (2015) han comparado los resultados de un modelo corrido con la misma variable, interpretada de manera estática en un caso y de forma dinámica en el otro. El patrón y localización del cambio simulado fue distinto en función del carácter dinámico o no de la variable empleada.

Camacho Olmedo (2018) y Camacho Olmedo et al. (2013) han comparado para variables independientes y mapas de potencial de cambio las diferencias introducidas en función de la conceptualización de la dimensión temporal del análisis. Modelos que generan su mapa de cambio potencial a partir de una única fecha (*land use potential maps*) muestran resultados distintos a aquellos que generan estos mapas a partir del cambio LULC entre dos fechas (*transition potential maps*). Mientras el primer tipo de modelos simula mejor la persistencia de las categorías que integran el área de estudio, el segundo tipo de modelos detecta mejor el cambio (Camacho Olmedo et al. 2013). Por su parte, variables independientes obtenidas a partir de un único punto temporal son más estables al cambio del periodo de tiempo de calibración que las variables obtenidas a partir de dos o más puntos temporales, las cuales varían de manera notable en función del intervalo considerado (Camacho Olmedo 2018).

B) La dimensión espacial

En lo que respecta a la dimensión espacial, la mayor parte de los modelos LUCC se desarrollan en formato ráster y, por tanto, adoptan el píxel como unidad básica de análisis (Abolhasani et al. 2016). Sin embargo, es creciente el número de modelos desarrollados sobre datos de tipo vectorial que, al contrario que los anteriores, adoptan el polígono o tesela (*patch*) como unidad de análisis, el cual puede poseer formas y tamaños diferentes.

Para el caso de modelos de crecimiento urbano, los modelos vectoriales suelen presentar un patrón más similar al real (Chen et al., 2013; Wang y Marceau, 2013). Simulan

el crecimiento de manera más compacta y homogénea, de manera semejante a como crecen las ciudades. Éstas lo suelen hacer teniendo en cuenta el parcelario catastral, adoptado como unidad de análisis en el caso de los modelos vectoriales. De este modo, las celdas o píxeles de los modelos ráster no tienen traslación al mundo real, con lo que su uso como unidad de análisis puede conllevar ciertos problemas conceptuales, algunos de los cuales quedan señalados por Wang y Marceau (2013) en su artículo.

Más allá del debate entre modelos ráster y vectoriales, la mayor parte de la investigación se ha centrado en las consecuencias que la agregación de las unidades de análisis tiene en los resultados del modelo, en relación con los modelos ráster y el concepto de resolución espacial (Díaz-Pacheco et al., 2018; Jantz y Goetz, 2005; Ménard y Marceau, 2005; Pan et al., 2010; Zhao, 2013). No obstante, se plantea también que el cambio de escala o resolución de los modelos vectoriales puede tener también consecuencias en sus resultados (Wang y Marceau, 2013), si bien no tenemos constancia de que estas hayan sido exploradas hasta el momento.

También la compartimentación del modelo en distintas regiones, con dinámicas específicas y que interaccionan entre sí, ha sido otro de los campos en los que se ha trabajado. En las siguientes secciones, abordamos cada una de estas líneas de trabajo en detalle.

a) La resolución espacial en los modelos LUCC

Los efectos que la resolución espacial tiene en la simulación de los cambios de usos y coberturas del suelo es, con diferencia, el aspecto más estudiado de la escala en los modelos ráster. Especialmente para el caso de los modelos de Autómatas Celulares (CA). No obstante, la especial conceptualización del espacio en este tipo de modelos (Couclelis 1997) nos lleva a realizar una consideración específica de los efectos de la resolución espacial en los mismos, la cual desarrollamos en la siguiente sección.

Para todos los casos, la elección de la resolución espacial se ha señalado como una decisión crítica (Blanchard et al. 2015) que, por tanto, puede afectar notablemente los resultados de la modelización realizada, tal y como han demostrado varios estudios empíricos sobre tal aspecto (Blanchard et al., 2015; Chen y Pontius Jr., 2011; Dietzel y Clarke, 2004a; Evans y Kelley, 2004; Jantz y Goetz, 2005; Kim, 2013). Hewitt y Díaz-Pacheco (2017) señalan como la resolución espacial tiene una importancia clave en la complejidad del comportamiento del modelo, incluso mayor a la introducida por un componente estocástico. De este modo, sostienen que a mayores resoluciones espaciales, mayor es la cantidad de celdas localizadas y, por ende, mayores son las posibilidades de simular un patrón complejo y menos previsible.

En muchas ocasiones, la resolución espacial se selecciona sin una adecuada justificación, tomando, sin discusión, la resolución de los datos originales o la recomendada por el propio modelo (Chen y Pontius Jr., 2011). Siguiendo las recomendaciones de Chen y Pontius Jr. (2011), Kim (2013) y Jantz y Goetz (2005), resulta necesario justificar esta decisión, comprobando para ello los efectos que la variación de la resolución espacial puede tener en los resultados de nuestro modelo.

En relación con el MAUP, datos a distintas resoluciones pueden revelar distintos procesos y patrones y, por ende, contar con un diferente poder explicativo (Fig. 6.11) (Moreira et al. 2009). En consecuencia, la selección de la resolución espacial puede tener un impacto notable en el contenido del modelo, es decir, en el proceso de cambio que explica, tal y como han revelado diferentes análisis empíricos a distintas escalas (Blanchard et al., 2015; Kok y Veldkamp, 2001; Veldkamp y Fresco, 1997). De hecho, Shchiptsova et al. (2016) determinan en su análisis sobre los factores que influyen en la densidad de población de la provincia de Sevilla que los factores económicos no fueron relevantes por no encontrarse a la escala óptima para el estudio del proceso analizado. Del mismo modo, en función de la resolución espacial seleccionada, las cantidades de cambio simuladas, en el caso de obtenerse a partir de los cambios en la ocupación del suelo observados en los mapas, variarán (Blanchard et al. 2015).

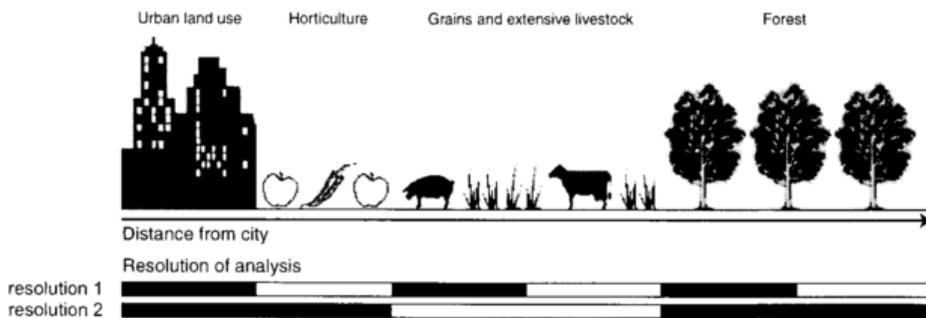


Figura 6.11. Diferente conceptualización de un sistema, siguiendo la teoría de Von Thünen, según la resolución espacial de análisis escogida. Fuente: tomado de Verburg y Chen (2000)

Como norma general, modelos a menores resoluciones espaciales muestran un mejor resultado con respecto a los datos de referencia que modelos a resoluciones espaciales más finas (Blanchard et al., 2015; Chen y Pontius Jr., 2011; Kok y Veldkamp, 2001). De este modo, a menores resoluciones espaciales, parte de los errores cartográficos de los datos originales pueden ser eliminados consecuencia de la agregación de los datos (Blanchard et al. 2015). De igual forma, cambios reales sobre la superficie terrestre tienden a abarcar importantes extensiones de terreno. En modelos de gran resolución, estos cambios quedan representados por muchos píxeles, mientras que en modelos a menor resolución tales cambios pueden ser replicados en uno o varios píxeles, con lo que la posibilidad de acierto del modelo es mayor (Blanchard et al. 2015). En estos casos, el cambio de resolución muestra la utilidad de la escala como herramienta para el manejo de la incertidumbre.

Cuando la información proporcionada por la mayor resolución espacial del modelo permite explicar nuevos elementos del mismo, resoluciones espaciales más detalladas fun-

cionan mejor (Evans y Kelley, 2004). Éstas deben ser así escogidas sólo cuando incrementan el poder explicativo del modelo (Chen y Pontius Jr., 2011). Mayores resoluciones espaciales incrementan la complejidad del ejercicio de modelización y, por tanto, suponen un mayor esfuerzo de calibración y validación, así como en la colección de datos (Kim 2013). También una mayor demanda computacional (Blanchard et al., 2015; Dietzel y Clarke, 2004a). De ahí que la selección de estas resoluciones deba estar justificada. De lo contrario, se pueden crear modelos en los que la resolución espacial de los datos sea más detallada que la resolución a la que el modelo puede determinar, con precisión, la localización de los cambios, como ocurrió en el caso de una aplicación del modelo GEOMOD (Blanchard et al. 2015).

b) Consideraciones específicas para el caso de los modelos de Autómatas Celulares (CA)

La particular conceptualización del espacio en los modelos CA (Couclelis 1997) nos lleva a manejar un concepto específico de la escala para ellos. Así, la escala se compone, en este caso, de tres elementos: la resolución espacial, el tamaño de la vecindad, y la forma de esta última (Pan et al. 2010; Morais Viana 2014). En este sentido, entendemos la vecindad como la región espacial utilizada para determinar la influencia que las celdas vecinas ejercen en la celda de análisis (Van Vliet et al. 2009).

Al igual que para el caso de la resolución espacial, la selección de estas variables es a menudo arbitraria (Morais Viana 2014; Altartouri et al. 2015). Sin embargo, poseen una influencia clara en los resultados del modelo (Kocabas y Dragicevic, 2006; Morais Viana, 2014; Pan et al., 2010; Zhao, 2013). No obstante, en función de los autores, varía la interpretación del impacto que provoca en el modelo la variación de estos componentes.

En algunos casos, el modelo cambia mucho más como consecuencia de la variación del tamaño de la vecindad que a causa de la diferente resolución espacial (Hasbani et al., 2011; Kocabas y Dragicevic, 2006; Morais Viana, 2014). Otros estudios revelan lo contrario (Ménard y Marceau, 2005). Incluso en ciertos casos se ha señalado una interferencia estadística poco significativa por la distinta escala utilizada, aunque visualmente esta sea más importante en relación con el diferente patrón observado (Díaz-Pacheco et al., 2018; Hewitt y Díaz-Pacheco, 2017). En cualquier caso, ambos elementos parecen influir en la simulación obtenida y, especialmente, en el patrón de la misma (Kocabas y Dragicevic, 2006; Ménard y Marceau, 2005). Lo mismo se puede apuntar para el tipo de vecindad considerada, señalándose la vecindad circular como la que introduce una mayor variación (Morais Viana 2014), especialmente a bajas resoluciones espaciales (Kocabas y Dragicevic, 2006).

En general, se apunta la existencia de una relación entre la resolución espacial y el tamaño de la vecindad (Pan et al. 2010; Altartouri et al. 2015), de tal manera que la modificación de uno de estos componentes debe ir vinculada a la variación del resto (Benenson 2007). A resoluciones espaciales más finas, las celdas son más similares entre sí y, a menudo, cada tesela (*patch*) o elemento paisajístico se encuentra formado por varias celdas. En consecuencia, para tener en cuenta el efecto que las teselas vecinas tienen en

la celda considerada, es necesario considerar vecindades de gran tamaño (Pan et al. 2010; Liao et al. 2016). Al contrario, a bajas resoluciones espaciales, las celdas inmediatas a la considerada incluyen los elementos que influyen sobre la misma, por lo que la consideración de vecindades más largas puede dar lugar a considerar que elementos muy distantes a la celda de origen influyen sobre la misma, cuando, en realidad, esto no resulta posible por la distancia que les separa (Pan et al. 2010; Morais Viana 2014). En estos casos, elementos próximos, pero no anejos, a la celda de análisis pierden importancia en la definición de su vecindad (Liao et al. 2016).

Rebatiendo la idea anterior, Van Vliet et al. (2009) plantean que, cuanto mayor sea la vecindad considerada y, por tanto, la información analizada, mejor será el modelo. Por su parte, Liao et al. (2016) precisan tal premisa, haciéndola especialmente válida para los modelos a mayores resoluciones espaciales, en relación con las ideas anteriormente desarrolladas. No obstante, la propuesta de Van Vliet et al. (2009), que proponen una vecindad variable, en la que el detalle de las celdas vecinas va disminuyendo desde las más próximas a la celda analizada a las más distantes, da respaldo conceptual a esa idea y permite, en efecto, ponerla de acuerdo con las planteadas anteriormente. No resulta así raro que el modelo CA propuesto por Van Vliet et al. (2009) proporcionase resultados satisfactorios. En este modelo, las vecindades más distantes determinan el área donde el cambio tiene lugar, mientras que las vecindades más próximas establecen la cantidad de cambio que finalmente se localiza (Van Vliet et al. 2009). La idea de vecindad de resolución variable permite además hacer frente a uno de los principales problemas de los modelos con vecindades de gran extensión: su elevado requerimiento computacional (Van Vliet et al. 2009; Liao et al. 2016).

Además, en varios estudios, se determina un rango de resoluciones espaciales en las que las variaciones en los resultados de la modelización son mínimos (Samat 2006; Zhao 2013; Morais Viana 2014). Se trataría, por tanto, del dominio de la escala (*scale domain*) en el que operaría el fenómeno analizado. Por último, según la resolución y vecindad considerada, los procesos simulados por el modelo pueden ser distintos (Bernard et al. 2008). De este modo, al igual que una variación de la escala entendida como resolución espacial puede ser víctima del MAUP, lo mismo es posible para el caso de la escala de los modelos CA.

c) La regionalización de los modelos

Cuando se delimita un área de estudio, esta suele corresponderse con un sistema lo más cerrado posible. Se trata de un sistema bastante coherente y factible de explicar mediante un modelo conceptual. Sin embargo, incluso en estos casos, el área seleccionada puede encerrar importantes disparidades, que generan patrones y procesos de cambio diferentes en cada parte (Verburg et al. 2010). Si bien todos se encuentran relacionados entre sí, cada uno queda explicado por dinámicas de detalle, que no son completamente trasladables a los otros casos.

Bernard et al. (2008) y Verburg et al. (2004b) han demostrado como las relaciones de vecindad entre usos y coberturas del suelo para un modelo CA varían en función de la parte de la zona de estudio considerada. Para un ámbito urbano, Bhatti et al. (2015) identificaron diferentes variables explicativas del cambio a escala urbana, periurbana y para el conjunto del distrito que integraba la ciudad analizada. La posibilidad de dividir el modelo en diferentes subregiones, objeto de reglas específicas, que detallen los procesos generales modelados, puede ser una solución a esta problemática, como han señalado Aguejidad et al. (2017) y Van Vliet et al. (2013b).

Evans y Kelley (2004) llevaron a cabo una mejora del modelo SLEUTH a partir de diferenciación de distintas subregiones en su calibración, permitiendo así tener en cuenta la heterogeneidad del área de estudio. Esto resultó en una mejora de la simulación. Mejoras similares se han detectado para el caso de otros software de modelización (Van Delden et al. 2011b; Kazemzadeh-Zow et al. 2016).

Vinculado al problema de la zonificación (*zoning problema*) que compone el MAUP, Kazemzadeh-Zow et al. (2016) señala como, a la hora de definir las subregiones que caracterizan la heterogeneidad espacial de un área de estudio, las divisiones de tipo administrativo suelen fallar a la hora de reflejar las áreas donde las dinámicas y procesos de cambio son distintas. En este sentido, proponen un procedimiento para la delimitación de subregiones a partir de la cantidad y densidad de cambios y el método de los polígonos de Thiessen. Verburg et al. (2010) revisan toda una serie de diferentes procedimientos y criterios para llevar a cabo la regionalización de un área de estudio para el estudio y modelización de la LUCC, proponiendo también un procedimiento específico.

C) La dimensión organizacional

Muchos de los sistemas modelados tienen un carácter multiescalar que, por tanto, cabe considerar en su conceptualización. Como hemos visto, a cada nivel de organización del sistema emergen una serie de propiedades características, que permiten el estudio de una serie de patrones o procesos espaciales diferentes. La conceptualización temática, es decir, en un diferente número de categorías, guarda estrecha relación con esos diferentes niveles de organización del sistema y las diferentes propiedades a las que cada uno puede ser estudiado.

Si bien la resolución temática guarda estrecha relación con la espacial (a mayor detalle espacial, mayor detalle temático, en tanto la abstracción realizada del espacio es menor), es fundamentalmente a partir de la categorización de los datos, que establecemos los diferentes niveles de organización de un sistema, así como su carácter jerárquico. De ahí que abordemos también en esta sección los efectos de la resolución temática para la LUCCM.

a) Los modelos multi-escalares y la modelización integrada

En relación a la conceptualización de los procesos que integran un determinado sistema, problemas pueden surgir como consecuencia de la existencia de varios procesos operando a distintas escalas. Se han ensayado enfoques multiescalares para dar solución a esta problemática (Verburg et al. 2007; Van Delden et al. 2011b; Kelly et al. 2013). En ellos, una de las principales fuentes de incertidumbre proviene de la forma en la que se produce la interacción entre procesos que operan a distintas escalas, no solo espaciales, sino también temporales y de organización jerárquica (Sohl y Claggett, 2013; Verburg et al., 2007), tratándose este de uno de los principales desafíos pendientes en el campo de la modelización (Van Delden et al. 2011a).

Metronamica, uno de los software de modelización empleados en la realización de esta tesis, permite conceptualizar el espacio modelado a dos escalas diferentes: regional y local (RIKS 2012), de acuerdo con el modelo propuesto por White y Engelen (2000, 1997). A nivel regional, el modelo considera las características demográficas y de empleo de cada región, planteando a partir de estas variables el poder atractivo de cada región para localizar y atraer actividad. Las regiones interaccionan entre sí, con flujos de actividad y población entre ellas, que permiten explicar los desarrollos contrastados de los diferentes ámbitos regionales para una misma área de estudio. A nivel local, las demandas calculadas por el modelo regional son localizadas de acuerdo con el potencial de cada espacio para atraer cada tipo de uso. Este potencial es definido de acuerdo con un conjunto de variables que, en lo esencial, siguen el denominado modelo NASZ (Escobar 2018). Van Delden et al. (2011b) revisan cinco aplicaciones multiescalares de modelización, desarrolladas en GEONAMICA, el entorno virtual en el que desarrolla el modelo Metronamica. Estas aplicaciones incluyen modelos a distintas escalas, siendo LUMOCAP PSS la aplicación más completa, al operar a cinco niveles: continental, nacional, regional y local (Van Delden et al. 2011b).

Elsawah et al. (2017) comparan las características de varios software de modelización, relevando cómo solo unos pocos permiten el desarrollo de modelos multi-escalares como los planteados. En este sentido, la mayor parte de los modelos se han venido desarrollando a una única escala (Heuvelink 1998; Lesschen et al. 2005), si bien existe una creciente preferencia por modelos multiescalares. Estos, sin embargo, siguen siendo escasos. Así, la creación de modelos integrados a partir de submodelos a diferentes escalas permanece como una de las necesarias tareas de investigación (Houet et al. 2010; Brown et al. 2013; National Research Council 2014).

b) La resolución temática

El nivel de detalle temático elegido es especialmente significativo en la LUCCM, con importantes consecuencias en los resultados de la modelización realizada (Conway, 2009; Dietzel y Clarke, 2004b; Gallardo Beltrán, 2014). Es, en este sentido, uno de los principales factores que determina la complejidad del modelo calibrado. Entendemos así la

complejidad, en términos simples, como el número de variables, procesos y relaciones que conforman el ejercicio de modelización (Van Delden et al. 2011b). Cuanto mayor es la resolución temática, contamos con un mayor número de variables dependientes, con lo que las relaciones entre éstas y los procesos que les afectan se hacen progresivamente más complejas. De ahí que una mayor resolución temática signifique nuevos niveles de organización jerárquica de los sistemas, por cuanto supone la aparición de nuevos procesos y relaciones de distinto tipo.

Consecuencia de ello, cambios en la resolución temática de un ejercicio de modelización han afectado tanto a las cantidades simuladas, como al patrón y localización del cambio (Conway, 2009; Dietzel y Clarke, 2006; Zhao, 2011). En lo que se refiere al primer punto, modelos a menores resoluciones temáticas tienden a simular más cambio (Conway, 2009; Dietzel y Clarke, 2006), en tanto la simplificación del espacio analizado en un menor número de clases tiende a incrementar el área de las categorías objeto de modelización, que incorporan los cambios de las clases que, a mayores resoluciones temáticas, no son modeladas. Conway (2009) señala como este aumento de las cantidades simuladas deriva en un incremento del poder predictivo del modelo. Éste cuenta así con más posibilidades de localizar el cambio, de acuerdo con la misma explicación de los procesos que determinan el dinamismo del área de estudio.

No obstante, cabe clarificar que, si bien en términos de modelización, la reducción del detalle temático se plasma en una mayor cantidad de píxeles simulados, la regla en el caso de la detección de cambios es diferente. En este caso, cuánto mayor es el detalle, más importantes son los cambios detectados (Nienkemper y Menz, 2016; Pontius Jr. y Malizia, 2004), al existir interacciones entre un creciente número de categorías que, por tanto, intercambian más superficie entre sí. De este modo, en modelización las cantidades simuladas crecen porque, habitualmente, el número de clases objeto de modelización es muy limitado. En consecuencia, al reducirse la resolución temática, la clase simulada integra cambios que en el nivel de mayor resolución pertenecían a otras clases. Sin embargo, cuando detectados en la cartografía, los cambios para el conjunto del mapa son siempre superiores en mapas con mayor detalle temático.

El patrón simulado tiende a ser más fragmentado como consecuencia de una mayor resolución temática (Dietzel y Clarke, 2006; Zhao, 2011). De acuerdo con el análisis de Dietzel y Clarke (2006), el incremento de la resolución temática a partir de modelos binarios (ej. urbano / no urbano), reduce la importancia del crecimiento orgánico de los fragmentos o teselas que conforman uno de los usos y favorece la aparición de nuevas teselas espontáneas del uso simulado en áreas con un alto potencial para su localización. De este modo, una mayor resolución temática incrementa la resistencia de ciertas clases al cambio y, por ende, la inercia del conjunto del área analizada a modificar su uso (Dietzel y Clarke, 2006). Fruto de todo lo anterior, los cambios son también localizados de manera diferente en función de la resolución temática seleccionada.

En general, aplicaciones con mayor resolución temática explican mejor el cambio LUCC que aplicaciones con una resolución temática dual (sí/no) (Dietzel y Clarke, 2006;

Zhao, 2011), especialmente en lo que respecta al patrón simulado, muy simplificado en el caso de los modelos con solo dos clases. Estos son especialmente inadecuados para el caso de los modelos CA (Zhao 2011), en tanto no permiten considerar las interacciones que se producen entre los distintos usos y coberturas del suelo; interacciones que, de hecho, son la base del funcionamiento de los modelos de autómatas celulares.

Al contrario, estudios que han comparado ejercicios de modelización con distintas resoluciones temáticas, no solo binarias, han revelado el papel de este componente de la escala como una herramienta clave para el manejo de la incertidumbre de los modelos. Conway (2009) y Hasbani et al. (2011) muestran como una gran resolución temática puede incrementar en exceso el número de relaciones y procesos a modelar, con lo que el modelo se vuelve excesivamente complejo como para conceptualmente adaptarse a la explicación del cambio que muestran los datos. Mas et al. (2018) comparten esta idea a la hora de proponer una serie de recomendaciones para la selección de las transiciones a modelar. También Van Delden et al. (2011b) plantean la necesidad de llevar a cabo una cuidadosa selección de la resolución temática, en relación con la cantidad de detalle que se puede explicar con precisión. Establecen que, en los casos que tal explicación no sea factible, debe optarse por menores resoluciones temáticas.

6.4.2. LOS DATOS EMPLEADOS

Datos a diferentes escalas y, por tanto, creados según distintos procedimientos, pueden mostrar para un mismo área de estudio información muy diferente (Bach et al., 2006; Pérez-Hoyos y García-Haro, 2009; Waser y Schwarz, 2006). La forma de obtención, especialmente en lo referido a la conceptualización de la heterogeneidad espacial del área de estudio, resulta fundamental a la hora de explicar las diferentes representaciones de un mismo territorio que estos datos pueden mostrar. De hecho, estas pueden llegar a ser contradictorias, como ocurre en el caso de los paisajes más heterogéneos, de los que los ámbitos mediterráneos pueden ser un buen ejemplo (Pérez-Hoyos et al. 2012).

Tanto el detalle temático como el espacial, así como la cobertura y el espaciado, son componentes de la escala que, según hayan sido tratados en cada caso, dan lugar a mapas distintos. Sin embargo, el usuario puede también utilizar tales componentes de la escala para reducir la incertidumbre asociada a esos datos. De este modo, varios estudios han mostrado como la similitud entre distintas cartografías de usos y coberturas del suelo es mayor a menores resoluciones temáticas (Bach et al., 2006; Grinblat et al., 2016; Pérez-Hoyos y García-Haro, 2013). A mayor acuerdo entre estas cartografías, se entiende que menor es la incertidumbre de la representación que realizan del espacio objeto de análisis.

Según los datos utilizados, y su correspondiente escala, los modelos producirán diferentes resultados (Syphard et al. 2011). La selección de los datos empleados en el ejercicio de modelización debe de tener en cuenta, por tanto, la forma en la que las distintas fuentes reflejan las características del ámbito de estudio (Li y Wu, 2006). Solo así se podrá

realizar una razonada decisión de la mejor fuente disponible a la escala de análisis deseada. De lo contrario, nuestra modelización puede contener una gran incertidumbre.

Tal incertidumbre puede incrementarse como consecuencia del proceso del escalado de los datos. Dendoncker et al. (2008) muestran como la resolución espacial y método de resamplado escogidos para el escalado de los datos puede dar lugar a mayores variaciones que las originadas como consecuencia de distintas narrativas, plasmadas en escenarios. Díaz-Pacheco et al. (2018) plantean también los efectos que la transformación vector-raster, el método de remuestreo escogido y la resolución espacial de análisis pueden tener en los datos utilizados para una aplicación LUCCM.

6.4.3. LA VALIDACIÓN DEL MODELO

La validación de los modelos se suele realizar a partir de la comparación de sus resultados con datos de referencia, siendo las técnicas estadísticas de comparación de mapas los métodos de validación más empleados (Van Vliet et al. 2016; Paegelow et al. 2018). Los mapas utilizados como referencia, al igual que todo dato geoespacial, cuentan con una incertidumbre derivada de la escala a la que se ha conceptualizado el sistema representado, que entra en relación con lo comentado en la sección anterior. La incertidumbre de estos datos, parte de ella proveniente de la escala, se trasladará también al proceso de validación.

Para una correcta validación del modelo, resulta esencial la coincidencia de la escala de validación con aquella a la que los procesos analizados han tenido lugar. Aquellas propiedades que emergen a un determinado nivel de análisis, sólo podrán ser validadas a partir de la escala a la que esas propiedades emergen. En este sentido, tal y como revela el estudio de Rosa et al. (2015), el periodo escogido (dimensión temporal de la escala) para la validación de un modelo, puede determinar los resultados de este análisis y, en consecuencia, nuestro criterio a la hora de determinar la validez de un modelo.

Muchos de los resultados proporcionados por los métodos y herramientas de validación son específicos de una escala, con lo que su resultado puede diferir de manera notable en función de la escala de validación escogida. Al respecto, Paegelow et al. (2018) plantean los efectos que el cambio de resolución temática puede tener en el cálculo del LUCC Budget. Del mismo modo, es inmensa la literatura destinada al análisis de los efectos de la escala sobre el cálculo de las métricas espaciales (Šímová y Gdulová, 2012), a menudo empleadas como técnicas de validación del patrón simulado. A fin de superar estas limitaciones, se aboga por la utilización de enfoques multiescalares en la validación de los modelos LUCC (Gallardo 2014; Aguejidad et al. 2017).

El trabajo de Costanza (1989) es uno de los primeros en plantear un enfoque multi-escalar de validación en el campo de la modelización. Propone un método que pasa por validar los resultados del modelo a múltiples resoluciones espaciales, ante la imposibilidad de correctamente validar éstos a partir de una única resolución. Más recientemente, tra-

bajos del equipo de Pontius Jr han seguido una dirección similar, en la búsqueda de métodos de validación a múltiples resoluciones espaciales (Pontius Jr. et al., 2011; Pontius Jr. y Cheuk, 2006; Pontius Jr, 2002). La utilización de varias resoluciones, más que identificar distintos patrones o procesos, permite distinguir aquellos desacuerdos en la localización menores, de aquellos mayores. En este sentido, se entiende que se dan errores en la localización de los cambios que, por su proximidad al cambio real, tienen cierto valor positivo, del que carecen cambios simulados en áreas completamente distintas a aquellas en las que éstos realmente se localizan. A esos errores de cierta significatividad se le denominan errores menores, pudiendo calcularse a partir de este enfoque multi resolución (Pontius Jr. et al. 2011). Con una lógica similar se han desarrollado las variantes de los estadísticos Kappa basados en la lógica borrosa (Fuzzy Kappa y Fuzzy Kappa Simulation), que consideran como acuerdo parcial a aquel localizado en el espacio vecino al lugar donde el cambio realmente ha ocurrido (Hagen 2003; Van Vliet et al. 2013a). Éstos índices permiten considerar el acuerdo localizado en áreas vecinas al acuerdo real e, incluso, el acuerdo basado en la simulación de usos o coberturas erróneos pero que, sin embargo, comparten un significado similar al del uso o cobertura modelada.

Por otro lado, la incertidumbre de un modelo para un área de estudio no tiene por qué ser igual para todo el ámbito analizado. Al contrario, la incertidumbre puede variar de acuerdo con las diferentes características del área estudiada y la consiguiente adaptación del modelo calibrado a las mismas. Enfoques de validación a una única escala (*extent*) pueden ser, por tanto, engañosos (Castilla y Hay, 2007; Fassnacht et al., 2006). En ellos, el incorrecto funcionamiento del modelo para un área específica puede quedar ocultado bajo la correcta modelización del resto del área de estudio. Se pueden señalar problemas similares para el caso de las distintas categorías que integran un modelo LUCC, en relación con el detalle o resolución temática. El análisis no tiene por qué adaptarse de igual forma a todas las categorías, sino que puede mostrar mejor resultado para unas respecto de otras (Castilla y Hay, 2007; Fassnacht et al., 2006).

6.4.4. VISUALIZACIÓN Y COMUNICACIÓN DE LOS RESULTADOS

A menudo, los resultados proporcionados por un modelo son numerosos y, en ocasiones, contienen demasiado detalle. En consecuencia, para su correcta visualización y comunicación es necesario producir una simplificación de los mismos, a partir de un cambio de escala, que introduce incertidumbre (Verburg et al. 2013). En ciertos casos, la escala a la que los usuarios demandan los resultados del análisis es diferente a la escala en la que éste ha tenido lugar, con lo que se necesita también un escalado de los datos obtenidos (Van Delden et al. 2011b). En todos los casos, el cambio de escala introduce importantes incertidumbres, que deben de ser correctamente manejadas. De este modo, debe evitarse caer en problemas de escalado como los mencionados en el apartado 6.3.3, de cara a evitar falsas inferencias por parte del usuario final de los resultados del modelo.

6.5. ¿QUÉ ESCALA SELECCIONAR? UNA PREGUNTA SIN RESPUESTA

Una vez concretado el marco conceptual de la escala y sus implicaciones para el caso de la LUCCM, cabe preguntarse qué escala debemos de seleccionar para nuestros estudios, ya sean estos de modelización, teledetección o, en general, para cualquier análisis espacial. La respuesta a esta pregunta no es sencilla. De hecho, no existe una respuesta perfecta para todos los casos.

No hay una escala óptima, ni tampoco un método ideal para la selección de ésta (Marceau 1999). En primer lugar por la propia concepción escalar y jerárquica de la realidad, que nos impide seleccionar una única escala a la que nuestros objetos de estudio puedan ser estudiados (Toro Balbotín 2014).

La escala es un continuo, que nos permite entender los diferentes niveles de organización de un sistema. La selección de una escala específica, supone una visión parcial de ese continuo. Una visión útil para el estudio de los fenómenos que a ese nivel ocurren, pero incompleta. Así, las interdependencias entre elementos y procesos que conforman cualquier sistema natural o socioeconómico trascienden, con mucho, cualquier escala de análisis. De ahí que la escala no sea más que una herramienta de trabajo y una ventana de percepción que nos permite trabajar con una abstracción de la realidad.

Tanto esa abstracción, como la escala seleccionada, contendrán incertidumbre. Ésta, sin embargo, es inevitable (Longley et al. 2011). En este sentido, si bien la selección de una escala de trabajo implica numerosas renunciaciones en el conocimiento total de la realidad, supone un paso elemental para la realización de cualquier estudio teórico o geoespacial, al permitir desentrañar la enorme complejidad del mundo real, imposible de procesar mental o computacionalmente. De esta manera, no se puede lograr una perfecta representación del mundo (Milad et al. 2016).

Los estudios de carácter multiescalar son una de las soluciones al problema conceptual anterior. En este sentido, muchos autores claman por la adopción de este enfoque (Veldkamp et al. 2001; Verburg et al. 2003; Moreira et al. 2009; Sohl et al. 2010). Si bien se sigue trabajando con simplificaciones del sistema analizado, este enfoque recoge mucho mejor la complejidad del sistema. No obstante, este enfoque también supone desafíos conceptuales, en relación con los intercambios de información entre escalas, e implica mayores requerimientos técnicos, así como en términos de información y tiempo.

Incluso en los casos en los que se opte por estudios multiescales, cabe seleccionar una o varias escalas concretas de análisis. Aunque no existe una decisión perfecta, sí hay escalas o, mejor dicho, rangos de escalas, que son más apropiados que otros (Blanchard et al., 2015; O'Sullivan y Perry, 2013). Para su identificación, una caracterización del comportamiento escalar del objeto de estudio parece indispensable (Evans y Kelley, 2004; Lloyd, 2014).

En las siguientes líneas realizamos una aproximación al estudio escalar de los procesos y elementos espaciales. A continuación, se define una posible guía o procedimiento a

seguir en la selección de la escala más apropiada para nuestros estudios. Finalmente, hacemos una revisión de propuestas e ideas concretas sobre la escala a seleccionar que se han planteado en la literatura.

6.5.1. LA CARACTERIZACIÓN ESCALAR DEL OBJETO DE ESTUDIO. UN REQUISITO PREVIO

La selección de una escala de análisis debe ser posterior al entendimiento del comportamiento escalar del objeto de estudio. Solo así una decisión razonada puede tener lugar. De lo contrario, la selección de la escala se convertirá en un mero acto de fe (Watson 1978).

Existen múltiples formas de evaluar ese comportamiento escalar, en función de los objetivos de nuestros análisis y las características del objeto de estudio. Lloyd (2014) apunta a la necesidad de caracterizar la denominada *scale of variation* de los elementos o procesos analizados, es decir, la escala a la que estos varían y cambian sus propiedades. ¿Son fenómenos estables sobre el espacio y el tiempo o, al contrario, cambian bruscamente sus propiedades en cortas distancias y periodos temporales? De este modo, un paso elemental pasa por entender la variabilidad y heterogeneidad de los objetos de estudio (Leao 2016). Esta determinará, sin duda, los efectos de la escala en los resultados de nuestros análisis.

Varios autores han revisado algunos de los innumerables procedimientos disponibles para caracterizar esa *scale of variation* (Cao y Siu-Ngan Lam, 1997; Lloyd, 2014; Marceau, 1999; Samat, 2006). Entre ellos, podemos mencionar el análisis fractal, análisis de regresión, análisis de textura, medidas de correlación, el método de la variancia geográfica (*geographic variance method*) propuesto por Moellering y Tobler (1972), el método de la variancia local (*local variance method*) propuesto por Woodcock y Strahler (1987), variogramas y semivariogramas, etc.

Para el caso de modelización, así como para muchos otros estudios geoespaciales, la realización de análisis de sensibilidad del modelo o herramienta utilizada en función de la escala seleccionada es uno de los métodos a seguir para la caracterización de la escala del fenómeno estudiado (Chen y Pontius Jr., 2011; Evans y Kelley, 2004; Munroe y Müller, 2007; Van Delden et al., 2011b).

6.5.2. PASOS A SEGUIR EN LA SELECCIÓN DE LA ESCALA O ESCALAS DE ANÁLISIS

Si bien resulta imposible establecer un único método para obtener la escala óptima de análisis, sí se puede definir una guía de pasos que nos ayude en la elección de aquellas escalas más apropiadas a los objetivos de nuestros estudios. En este sentido, la selección de la escala es un proceso complejo, que ha de requerir determinar los objetivos de nues-

tro análisis, un conocimiento profundo del sistema elegido, evaluar los datos e información disponibles, entender las limitaciones computacionales y temporales de nuestro análisis y, finalmente, conocer las necesidades del usuario final.

El objetivo u objetivos de nuestro estudio determinan, en primer lugar, un amplio rango de escalas sobre las que trabajar. De este modo, el análisis de cuestiones de detalle requerirá del empleo de escalas más pormenorizadas que aquellos estudios que aborden elementos o procesos genéricos. Escalas pormenorizadas caracterizan los detalles, mientras que escalas de menor detalle describen las características abstractas de los sistemas (Wu y Li, 2009). Dicho de otra forma, mientras unas abstraen la variabilidad o heterogeneidad del objeto de estudio, otras muestran ésta a costa de sacrificar las tendencias generales (Verburg et al. 2003). En este sentido, O'Sullivan y Perry (2013) plantean la necesidad de encontrar un equilibrio entre generalidad, precisión y realismo, inversamente relacionados.

Por otro lado, el sistema de análisis opera a distintas escalas o niveles, a los cuales emergen ciertas propiedades del sistema. Estudiar correctamente estos niveles es esencial para discernir las escalas que nos son útiles, es decir, aquellas escalas donde los procesos o propiedades que pretendemos estudiar aparecen. Es lo que Wu (2007) ha definido como las escalas características (*characteristic scales*). En relación con ello, ámbitos heterogéneos y de gran variabilidad exigen escalas de mayor detalle que áreas más uniformes (Prestele et al. 2016), si bien resulta necesario encontrar el equilibrio óptimo entre generalidad y detalle, en tanto excesivo detalle puede ocultar las tendencias que queremos observar, como ha señalado García-Llamas et al. (2016) para el caso de las áreas de montaña, caracterizadas por su heterogeneidad. Se trata de lo que anteriormente hemos aludido al mencionar la *spatial scale of variation*, denominado por Van Vliet et al. (2016) como el rango de variación. De este modo, el conocimiento del sistema de estudio pasa irremediablemente por la caracterización de su comportamiento escalar, en relación a lo que hemos abordado en la sección anterior de este capítulo.

Los datos disponibles no son infinitos, ni nos proporcionan todas las escalas y detalle que deseamos (Van Delden et al. 2011a). Al contrario, estos son limitados, especialmente en el caso de países donde el desarrollo de los datos espaciales es aún escaso. En consecuencia, la selección de la escala de análisis debe de estar en relación con las posibilidades que las fuentes ofrecen (Van Delden et al. 2011b). De nuevo, resulta necesario lograr un equilibrio entre aquella escala más idónea para el estudio del sistema analizado de acuerdo con nuestros objetivos, y aquellas escalas que los datos proporcionan. No es un punto trivial, por cuanto, en ocasiones, renunciar a parte de los objetivos de nuestro análisis puede ser un paso requerido para alcanzar resultados significativos, dada la limitación de fuentes disponibles. Verburg et al. (2011) plantean la existencia de estas limitaciones en relación a la escala temporal del análisis.

A las limitación de datos cabe sumar la limitación analítica, en relación con nuestra capacidad para comprender y analizar un sistema, en función de su complejidad. Nuestra mente puede no ser capaz de analizar sistemas a escalas de excesivo detalle. Tampoco un

ordenador capaz de recrear éstas, aunque ello dependerá de la capacidad computacional del dispositivo empleado.

Finalmente, la escala seleccionada debe tener también en cuenta al destinatario final del análisis, es decir, al usuario de los resultados del mismo (Reed et al. 2017). A menudo, la escala a la que los usuarios finales demandan la información no coincide con la escala a la que el proceso opera (Van Delden et al. 2011b). En este sentido, los agentes que demandan análisis para tomar decisiones suelen requerir realismo y especificidades, a la par que enfoques simples, fáciles de entender (Clarke, 2004; Sohl y Claggett, 2013). En el campo académico e investigador, el realismo y los detalles se suelen conseguir a base de enfoques complejos y, por consiguiente, difíciles de entender. Es así necesario llegar a un equilibrio entre ambas demandas.

Con todo, elegir una o varias escalas de análisis ha de pasar por la consideración de un buen número de cuestiones que afectan y limitan el estudio que se va a realizar. El usuario debe de tratar de garantizar el mayor equilibrio posible entre ellas. Siguiendo la tesis de Van Delden et al. (2011b), se debe de buscar el equilibrio ente el usuario, la ciencia y los datos.

6.5.3. PROPUESTAS CONCRETAS DE ESCALAS A UTILIZAR

Aunque nuestra recomendación pasa por seguir los pasos arriba indicados, numerosos autores han planteado reglas más o menos genéricas para la selección de las escalas de análisis que, de cara a llevar a cabo una completa revisión del problema, merece la pena reseñar aquí. En este sentido, son numerosas las contradicciones en función de los autores y su campo de trabajo, lo que revela la dificultad e, incluso, imposibilidad, de formular criterios generales para la selección de la escala de análisis apropiada.

En algunos casos se plantean resoluciones mínimas para determinado tipo de estudios o análisis. Grinblat et al. (2016) señalan que la resolución de las imágenes satélites en los modelos CA debería de ser, como mínimo, de 10m. No obstante, plantean, en general, los problemas asociados a los modelos CA ráster y, por tanto, la preferencia de modelos vectoriales sobre los primeros. Antrop (2004) considera que solo a partir de resoluciones de, al menos, 5m, puede llevarse a cabo una correcta identificación de los usos y cubiertas del suelo en los paisajes urbanos más complejos, en relación con la enorme heterogeneidad de los usos y cubiertas en estos ámbitos. Herold et al. (2005) citan una serie de estudios que siguen la misma tesis que Antrop.

Otros estudios, con propuestas menos rotundas, proponen reglas o guías más genéricas en la ayuda para realizar la selección de una escala de análisis. Dietzel y Clarke (2004a) sugieren una guía de cuatro resoluciones espaciales, según la extensión del área de estudio seleccionada, para la calibración y validación de modelos LULC: 250m-1km de resolución espacial para estudios a escala nacional, 250m para la escala estatal, 30-100m para la escala metropolitana y 30-10m para la escala de ciudad. Congalton (1997) cita un estudio de

Piwowar que, en relación con la conversión vector-raster, señala que la resolución espacial óptima es aquella que coincide con la cuarta parte del polígono mínimo que compone el dato vectorial a transformar. Con una idea similar, Samat (2006), tomando la idea de otros estudios previos, señala que, para mantener la precisión de los datos que se utilizan, la resolución utilizada debe ser mayor que la mitad del polígono o tesela más pequeño representado en los datos analizados. Por su parte, Blanchard et al. (2015) hacen una revisión de estudios similares a los anteriores, los cuales proponen normas de similar naturaleza, pero en base a distintos rangos. Finalmente, en relación con la resolución temática elegida para ejercicios de modelización, Zhao (2011) plantea utilizar aquellos datos con un mayor detalle temático, al asociar esto a una mejora de los resultados del modelo.

Hengl (2006) ha propuesto un método en la ayuda a la selección de la resolución espacial más adecuada en función de la escala cartográfica de los datos, el área mínima cartografiable de éstos, la precisión de los datos GPS recolectados, el tamaño de las delimitaciones, la densidad de puntos, según la distribución espacial de una serie de puntos, de acuerdo con la dependencia espacial de los datos o bien debido a la complejidad del terreno. Este método propone la resolución más y menos detallada a usar en cada caso, así como la recomendada, que se suele corresponder con el punto intermedio entre las dos anteriores. El método, aunque muy centrado en algunos de los componentes de la escala y, por tanto, en la dimensión más puramente cuantitativa de ésta, puede servir de guía para el cartografiado de los datos, en tanto nuestro interés pase por la correcta representación de la información contenida en los datos de origen, más allá del análisis que posteriormente podamos realizar con estos y, por tanto, de la escala más interesante deseada para ese análisis.

6.6. CONCLUSIONES

En este capítulo hemos realizado una completa revisión a los problemas de la escala en la Modelización de Cambios de Usos y Coberturas del suelo (*Land Use Cover Change Modelling*, LUCCM). Se trata de un problema muy complejo y para el que no existen soluciones únicas ni simples.

La mayor parte de la investigación que aborda los problemas de la escala, en relación con la incertidumbre que ésta introduce en nuestros análisis, sigue partiendo de marcos conceptuales distintos y analizando la cuestión escalar de una manera sesgada, a partir de una visión reduccionista del concepto de la escala. De este modo, hacen falta estudios integrales de la influencia que la selección de la escala tiene en cualquier análisis geoespacial y, en especial, en la LUCCM. Sólo a través de estos estudios se puede lograr una completa comprensión de la incertidumbre de nuestros análisis consecuencia de la escala escogida para ellos.

Gran parte de la literatura analizada se ha destinado a analizar la influencia que la dimensión espacial de la escala y, fundamentalmente, la resolución espacial, tiene en la

LUCCM. Sin embargo, menores esfuerzos se han destinado al análisis de los otros conceptos y componentes de la escala que, por tanto, aún permanecen como importantes líneas de investigación a tratar.

El marco conceptual aquí planteado supone un primer paso en la investigación integral de los efectos de la escala en la LUCCM. Sin embargo, quedan pendientes estudios prácticos y teóricos que planteen una visión holística de las consecuencias asociadas a la selección de los distintos tipos y componentes de la escala, especialmente a aquellos menos explorados.

III

Análisis de la incertidumbre en la cartografía de Usos y Coberturas del Suelo

Capítulo 7

Fuentes cartográficas para el estudio del cambio de usos y coberturas del suelo. Estado de la cuestión ¹

7.1. INTRODUCCIÓN

El estudio de los cambios de usos y coberturas del suelo (*Land Use Cover Change*, LUCC) ha experimentado un notable auge en las últimas décadas, debido a la creciente disponibilidad de fuentes para la realización de este tipo de análisis. Pese a tal incremento, aún son numerosos los desafíos existentes con relación a la aplicabilidad práctica de esta información.

Desde que se obtuviesen los primeros mapas² de Usos y Coberturas de Suelo (*Land Use Land Cover*, LULC) a escala global en los años 80, se han realizado importantes avances: avances técnicos en relación con las metodologías empleadas para la obtención de estos datos (ej. técnicas de clasificación); mayor disponibilidad y detalle de las fuentes primarias para el estudio del territorio (imágenes satélite y fotografía aérea); desarrollo de numerosas iniciativas para compatibilizar y, en cierta medida, homogeneizar, las distintas bases de datos disponibles. El reciente cambio de metodología en la obtención de la cartografía de ocupación del suelo para el caso de Andalucía (Gil et al. 2010), o en la obtención de CORINE Land Cover (CLC) para los distintos países europeos (Hazeu et al. 2016), da buena prueba de cómo tales avances aún se continúan realizando hoy en día.

A pesar de tales mejoras, y en parte consecuencia directa de las mismas, aún continúan vigentes algunos de los desafíos clave en la obtención de bases de datos LULC. Siguen siendo necesarios avances respecto a la resolución (espacial, temática y temporal) de los datos base, las metodologías de obtención de mapas LULC o bien en lo relativo a las estrategias de validación (Herold et al. 2008; Verburg et al. 2011). Del mismo modo, se resalta como otra de las tareas pendientes la compatibilidad de los distintos mapas, a

¹ Este capítulo ha sido elaborado a partir de una comunicación presentada al *I Congreso Internacional de las Montañas, Sierra Nevada 2018*.

García-Álvarez D, Camacho Olmedo MT. Fuentes para el estudio de los cambios de Usos y Coberturas del Suelo. Estado de la cuestión. En: *I Congreso Internacional de las Montañas, Sierra Nevada 2018*. Granada. Aceptada.

² Como se ha planteado en el Capítulo 3, se utiliza el término “mapa” como sinónimo de capa espacial de información geográfica. Sin embargo, en un sentido estricto, este término se refiere únicamente al producto cartográfico obtenido una vez manipulada la información geográfica y presentada de tal forma que se facilita su comunicación (Feranec 2016).

partir de una armonización de sus respectivas leyendas (Yang et al. 2017a), así como, especialmente, la consecución de series temporales LULC consistentes, sin ruido debido a cambios de origen técnico (Kuemmerle et al. 2013).

Entre las mejoras realizadas hasta el momento en tales direcciones podemos destacar el marco común para el desarrollo de leyendas para mapas LULC globales propuesto por la FAO (Di Gregorio y Jansen 1998), el reciente lanzamiento de la constelación de Satélites Sentinel (Aschbacher y Milagro-Pérez 2012) o la iniciativa CORINE en la coordinación para la obtención de un mapa LULC para toda Europa bajo los mismos criterios técnicos (European Environment Agency 1994).

En este capítulo pretendemos realizar una revisión de las fuentes cartográficas disponibles para el estudio de las dinámicas de cambio de usos y coberturas del suelo, tanto a nivel global, como continental, nacional y regional, tomando como referencia el caso de Asturias. Mediante esta revisión, se persigue determinar el estado de la cuestión, así como señalar las principales limitaciones que presentan los actuales mapas LULC para el estudio del cambio en la ocupación del suelo. Como resultado, se espera obtener un adecuado conocimiento de las fuentes cartográficas LULC disponibles, de cara a la selección de aquellas más adecuadas para acometer los análisis previstos en esta tesis doctoral.

7.2. FUENTES CARTOGRÁFICAS PARA EL ESTUDIO DEL *LAND USE COVER CHANGE* (LUCC)

7.2.1. IDENTIFICACIÓN Y RECOPIACIÓN DE FUENTES

La revisión de las fuentes cartográficas de Usos y Coberturas de Suelo (*Land Use Land Cover*, LULC) se ha realizado a partir de la recopilación de los datos facilitados por los principales portales digitales de referencia en lo relativo a la información LULC (Tabla 7.1). Se han seleccionado aquellas fuentes disponibles para el conjunto de Asturias. En este sentido, estudios similares para otro tipo de regiones pueden arrojar conclusiones distintas a las aquí planteadas.

Las fuentes recopiladas se han estructurado según dos criterios. En primer lugar, en función de su cobertura espacial. Diferenciamos en este sentido entre fuentes cartográficas a escala global, continental, nacional y regional. Cada una de estas escalas suele corresponder con un determinado nivel de detalle en la información mostrada, así como con métodos de obtención similares.

En segundo lugar, los datos se han clasificado en función de la naturaleza y fin del mapa, distinguiendo para cada caso entre fuentes LULC generales y datos de orientación temática. Éstos últimos han sido diseñados con el propósito de cartografiar en detalle uno o varios usos o coberturas específicos, proporcionando poca información para el resto. Las fuentes cartográficas LULC generales proporcionan información sobre todos los usos y coberturas del suelo, sin prestar excesivo detalle a ninguna de ellas en particular.

Tabla 7.1. Portales web consultados para la recopilación de las fuentes cartográficas LULC analizadas

Portal	Breve descripción	URL
<i>Portales para datos a nivel global o continental (Europa)</i>		
Copernicus Land Monitoring Service	Portal que recoge todas las fuentes de usos y coberturas del suelo generadas como parte del programa Copernicus, promovido por la Unión Europea. Junto a los mapas sobre la ocupación del suelo, se proporcionan distintos productos temáticos de detalle sobre determinadas cubiertas, valores espectrales, etc.	http://land.copernicus.eu/
FAO GeoNetwork	Relación de fuentes cartográficas LULC disponibles a distintas escalas y para diferentes espacios del mundo. Incluye un conjunto muy heterogéneo de datos, desde cartografía geológica, de vegetación, hasta enfoques LULC más genéricos (ej. Africover).	www.fao.org/geonetwork/ (Sección <i>Land Cover y Land Use</i>)
Geo-Wiki	Incluye una aplicación que permite consultar, a través de un visor geográfico, las principales bases de datos LULC a nivel global, así como realizar comparaciones entre las mismas. Incluye también fuentes cartográficas a escala continental y nacional para ámbitos como África, Australia o Rusia.	www.geo-wiki.org
Global Land Cover Facility	Incluye una relación de bases de datos LULC globales obtenidas a partir de técnicas de teledetección. También proporciona información sobre diferentes productos secundarios obtenidos a partir de los mismos sensores y plataformas de teledetección utilizados para la obtención de esos productos LULC (ej. AVHRR, MODIS, sensores Landsat...).	http://glcf.umd.edu/
MIT library	Sección específica de la biblioteca del Massachusetts Institute of Technology dedicada a los datos LULC. Recoge información sobre las principales bases de datos globales, aunque con especial incidencia en las fuentes específicas para Estados Unidos.	https://libguides.mit.edu/gis/land
The USGS Land Cover Institute	Incluye una página (<i>Get land cover data</i>) de enlaces a las principales bases de datos LULC, tanto a nivel global como para cada uno de los continentes. Además, incorpora un apartado específico sobre los datos disponibles para Estados Unidos.	https://landcover.usgs.gov/
<i>Portales para datos a nivel nacional (España) o regional (Asturias)</i>		
IDE del MAPAMA	Infraestructura de datos espaciales del Ministerio de Agricultura y Pesca y Alimentación y Medio Ambiente que incluye información sobre varias fuentes cartográficas LULC de orientación temática como el Mapa Forestal de España o el Mapa de Cultivos y Aprovechamientos.	www.mapama.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/
IGN	Proporciona la relación de datos geográficos elaborados o promovidos por el Instituto Geográfico Nacional, entre los que se encuentran las cartografías LULC CORINE y SIOSE.	http://centrode-descargas.cnig.es/
SITPA-IDEAS	Sistema de Información Territorial e Infraestructura de Datos Espaciales del Principado de Asturias. Incluye toda la relación de datos espaciales producidos o gestionados por parte de la administración del Principado de Asturias. Sólo una parte de ellos se encuentra disponible para descarga directa por parte del usuario.	http://sitpa.cartografia.asturias.es

7.2.2. FUENTES CARTOGRÁFICAS A ESCALA GLOBAL

7.2.2.1. Fuentes generales LULC

Todas las fuentes cartográficas LULC a escala global se obtienen a partir de técnicas de teledetección de imágenes de satélite (Tabla 7.2). Éstas suelen ser clasificaciones digitales, supervisadas o no supervisadas, con un menor uso de clasificaciones orientadas a objetos. Además, suele ser habitual el empleo de conocimiento experto, ya sea para el entrenamiento del clasificador seleccionado, o bien para las tareas de postclasificación y revisión de los resultados alcanzados.

Al confiar en imágenes satélite y métodos digitales de teledetección, estas fuentes aportan fundamentalmente información acerca de la vegetación natural, la cobertura más fácil de diferenciar de acuerdo con este tipo de metodologías. La resolución o detalle temático de las clases artificiales y agrícolas suele ser muy baja. No hay ningún producto que distinga más de un tipo de clase artificial, debido a la heterogeneidad espacial de este tipo de categorías, solo posible de distinguir a escalas de detalle. En lo que respecta a las clases agrícolas, la mayor parte de los mapas solo distingue una única categoría. El LC-CCI es el producto que más resolución temática aporta en este sentido, al distinguir hasta tres clases agrícolas diferentes (Tabla 7.2). Estas bases de datos no ofrecen, por tanto, grandes posibilidades para el análisis de los paisajes más humanizados.

La mayor parte de los productos comparten la misma o similares leyendas, siendo las dos más difundidas la IGBP y el sistema de clasificación propuesto por la FAO. No obstante, pese a tales similitudes, existen importantes contradicciones entre los distintos mapas LULC disponibles (Giri et al. 2005; Yang et al. 2017b). De este modo, pese a la utilización de similares leyendas, cada mapa realiza interpretaciones distintas del significado de las categorías consideradas.

La resolución espacial de las fuentes cartográficas LULC globales suele ser bastante baja, si bien ha ido mejorando paulatinamente, consecuencia de la creciente disponibilidad de imágenes satélite a mayores resoluciones espaciales. Inicialmente, la resolución de la mayor parte de los mapas era de tan sólo 1 km. Se trata del detalle proporcionado por el sensor AVHRR del satélite NOAA. Con la aparición de los sensores MERIS y MODIS, a bordo de los satélites Aqua y Terra, se generaron productos a resoluciones de mayor detalle: 500-300m. Finalmente, la distribución de la serie histórica de imágenes Landsat de manera abierta, sin coste, ha facilitado su uso para la producción de fuentes cartográficas LULC globales. El FROM-GLC-agg y el GLC30 son así fruto de la política de acceso de datos abiertos de la NASA. Constituyen las bases de datos globales LULC de mayor detalle (30m), comparable al proporcionado por productos a escala continental e, incluso, en algunos casos, nacional.

En lo que respecta a la resolución temporal, la mayor parte de los productos LULC globales están solo disponibles para una única fecha o bien para cortos periodos de

Tabla 7.2a. Relación de fuentes cartográficas LULC globales

		UMD LC Classification	IGBP-DIS	LC-CCI	GLC2000	GLC30
Producto		Mapa LULC	Mapa LULC	Mapa LULC	Mapa LULC	Mapa LULC
Escala de trabajo		Global	Global	Regional (10 equipos de trabajo)	Regional (30 equipos de trabajo)	Global
Obtención (según el método más reciente empleado)	Método principal	Clasificación supervisada y posterior revisión a escala regional del etiquetado	Clasificación no supervisada	Clasificación no supervisada para obtener mapa de referencia	Clasificación no supervisada	Clasificación supervisada
	Otros métodos	-	Cartografía individual de ciertas clases	Detección de cambios para modificar mapa de referencia	Posibilidad de modificaciones del método por parte de cada equipo de trabajo regional	-
	Fuentes base	Sensor AVHRR	Sensor AVHRR	Sensor MODIS para mapa de referencia. Sensores AVHRR, VEGETATION, MERIS y PROVA-V para identificación de cambios.	Sensor VEGETATION	Sensores de las misiones Landsat y HJ-1
	Revisión experta	Sí	Sí	Sí	No (solo etiquetado de coberturas obtenidas mediante clasificación)	Sí
	Cambios metodológicos	-	-	No	-	No
Escala / Resolución espacial		1 km / 8 km / 1 grado Mapa obtenido por clasificación para cada resolución.	1 km / 0.25 / 0.5 / 1 grado UMC: Seasonal LC Regions Resolución original 1km. El resto obtenidas por remuestreo.	300m. UMC* cambios > 1km.	1km	30 m UMC variable según la categoría (de 3x3 a 10x10 pixeles)
Leyendas admitidas		IGBP	IGBP / SiB	FAO LCCS	FAO LCCS	GLC30
Nº total de clases		14 (1-8km); 12 (1 grado)	17	30	22	10
Clases artificiales (a); agrícolas (ag); vegetación (v); mosaico agrícola / vegetación (m) y error / sin datos (na)		1 (a), 1 (ag), 10 (v), 0 (m), 0 (na) [1-8km]	1 (a), 1 (ag), 10 (v), 1 (m), 1 (na) [IGBP]	1 (a), 3 (ag), 20 (v), 2 (m), 1 (na)	1 (a), 1 (ag), 15 (v), 2 (m), 0 (na)	1 (a), 2 (ag), 4 (v), 0 (m), 0 (na)
Resolución temporal		Una fecha (92-93 [1km]; 84 [8km]; 87 [1 grado])	Una fecha (92-93)	Anual periodo 98-15 Prevista actualización	Una fecha (99-00)	2 fechas (00 y 10)
Referencia [1] / descarga [a] **		[1] [2] [3] [a]	[4] [b]	[5] [c]	[6] [d]	[7] [e]

*UMC: Unidad Mínima Cartografiable ** Véase el Anexo 3 // Las fuentes se encuentran ordenadas con acuerdo a la fecha para la que muestran información, desde la que incluye el mapa más antiguo, hasta la más actual. Fuente: Elaboración propia

Tabla 7.2b. Relación de fuentes cartográficas LULC globales (continuación)

		FROM-GLC-agg	GeoWiki Hybrid	MODISLC	GLCNMO	GlobCover	FAO-GLCShare
Producto		Mapa LULC	Mapa LULC	Mapa LULC	Mapa LULC	Mapa LULC	Mapa LULC y mapa de fracción de cada cubierta
Escala de trabajo		A nivel de escena	Global	Global	Continental	Continental / Regional	Global
Obtención (según el método más reciente empleado)	Método principal	Clasificación supervisada	Fusión de datos (GWR)	Clasificación supervisada	Clasificación supervisada	Clasificación no supervisada	Fusión de datos
	Otros métodos	Clasificación individual de las superficies selladas	Dos estrategias de fusión de datos, generando dos mapas distintos Croawrsurcing para el mapeo de las áreas de entrenamiento	Cartografía individual de áreas artificiales	Cartografía individual de clases específicas	Clasificación supervisada para clases específicas	-
	Fuentes base	Sensores Landsat y MODIS	Mapas LULC GLC2000, GlobCover y MODIS LC	Sensor MODIS	Sensor MODIS	Sensor MERIS	Múltiples mapas LULC ya desarrollados (regionales, continentales y globales)
	Revisión experta	No	No	Sí	No	Sí	No
	Cambios metodológicos	-	No	Sí	No	Sí	-
Escala / Resolución espacial		30m / 250m / 500m / 1km / 5km / 25km / 50km / 100km Resolución original 30m. El resto obtenidas por re-muestreo	300m	500m / 5' / 5 grados Resolución original 500m. El resto obtenidas por re-muestreo.	1km [2003]; 500m [2008-13]	300 m	1 km
Leyendas admitidas		(dos niveles)	FAO LCCS	IGBP / LAI / FPAR / BGC / PFT	FAO LCCS	FAO LCCS	FAO LCCS
Nº total de clases		25 (nivel más detallado)	10	17	20	23	10
Clases artificiales (a); agrícolas (ag); vegetación (v); mosaico (m) y error / sin datos (na)		2 (a), 4 (ag), 9 (v), 0 (m), 1 (na)	1 (a), 1 (ag), 3 (v), 1 (m), 0 (na)	1 (a), 1 (ag), 10 (v), 1 (m), 2 (na) [IGBP]	1 (a), 2 (ag), 11 (v), 1 (m), 0 (na)	1 (a), 2 (ag), 14 (v), 2 (m), 1 (na)	1 (a), 1 (ag), 5 (v), 0 (m), 0 (na)
Resolución temporal		Una única fecha (10)	Una única fecha, diferente según la fuente original (00 o 05)	Annual periodo 01-13 Prevista actualización	3 fechas (03, 08 y 13)	2 fechas (04-06 y 09)	Una única fecha, diferente para cada parte del mundo, según la fuente original.
Referencia [1] / descarga [a] **		[8] [9] [f]	[10] [g]	[11] [12] [h]	[13] [14] [15] [i]	[16] [j]	[17] [k]

*UMC: Unidad Mínima Cartografiable ** Véase el Anexo 3 // Las fuentes cartográficas se encuentran ordenadas con acuerdo a la fecha para la que muestran información, desde la que incluye el mapa más antiguo, hasta la más actual. Fuente: Elaboración propia

tiempo. Además, varios de los productos que proporcionan una serie temporal (ej. GlobCover, GLC30, GLCNMO) han sido obtenidos a partir de iniciativas individuales que no prevén la actualización del producto.

Entre los productos con una serie temporal más larga y que, además, prevén su actualización, se encuentran el LC-CCI (mapa anual de 1998 a 2015) y el MODISLC (mapa anual de 2001 a 2013). Sin embargo, la metodología de producción de MODISLC ha variado con el tiempo (Friedl et al. 2010), con lo que se han generado cambios de origen técnico en la serie temporal de mapas que dificulta el estudio riguroso del cambio de los usos y coberturas del suelo a partir de ellos.

La colección 5 de los productos MODISLC, lanzada a finales de 2008, incrementó la resolución espacial de los mapas LULC (de 1km a 500m) e incorporó cambios en el procedimiento de clasificación de las coberturas identificadas (Friedl et al. 2010). A modo de ejemplo, desde la colección 5 las áreas urbanas del MODISLC son clasificadas mediante un procedimiento metodológico distinto al utilizado para el resto de categorías. Consecuencia de todo ello, en torno al 30% de toda la superficie mundial se encuentra clasificada de manera distinta en las dos colecciones del MODISLC (Friedl et al. 2010). Para la producción de la colección 6 se esperan cambios en el procedimiento de clasificación general empleado. Se pretende sustituir los árboles de decisión por el método *random forest*. Además, se pretende migrar la leyenda del mapa al marco propuesto por la FAO (Friedl et al. 2010).

Ya han sido publicados ciertos trabajos en relación con otras mejoras esperadas en la nueva colección del producto MODISLC (Cai et al. 2014). Éstas, inevitablemente, ahondarán en la presencia de cambios de origen técnico en el análisis de la variación de las coberturas de la serie temporal MODISLC.

En el caso del GlobCover, si bien la metodología de producción ha sido la misma en sus dos ediciones (2005 y 2009), la comparación de ambos mapas muestra un gran número de cambios que no son reales. Se trata de cambios consecuencia de pequeñas variaciones de la reflectancia de las cubiertas para cada uno de los años analizados, que el clasificador automático de teledetección empleado ha interpretado de manera distinta en cada caso. Este tipo de cambios, consecuencia de la incertidumbre del procedimiento de clasificación utilizado, hace que la comparación directa de las dos ediciones del mapa GlobCover para detectar los cambios en los usos y coberturas del suelo no sea posible, en tanto no refleja los cambios reales que han ocurrido sobre el terreno (Bontemps et al. 2011).

Sólo el LC-CCI proporciona una serie temporal de mapas coherente. En ella, la comparación de mapas para distintas fechas revela los cambios de usos y coberturas reales, no técnicos. Ello se debe a que este producto se ha diseñado con el fin de cumplir con tal propósito, es decir, buscando ante todo la coherencia espacial de los mapas para las distintas fechas (ESA 2017). No obstante, derivado de la diferente información espacial disponible en cada año, los cambios han sido cartografiados a distinta resolución antes y

después de la aparición del sensor MERIS, que permite trazar estos cambios a una resolución espacial de 300m, frente a la resolución de 1km anteriormente utilizada (ESA 2017).

En los casos de productos obtenidos a partir de la fusión de otros mapas previamente creados, como GeoWiki Hybrid o FAO-GLCShare, no existe una única referencia temporal para todo el mapa. Dependiendo del área considerada, los datos reflejan el estado de la superficie terrestre para una fecha distinta. Esto impide la utilización del conjunto del mapa para el estudio de los cambios en la ocupación del suelo.

En lo que respecta a la información técnica proporcionada por cada producto, esta suele ser escasa. En la mayor parte de los casos la información que se proporciona en el website del producto es limitada e introductoria. Para la consideración de los aspectos técnicos de detalle cabe entonces recurrir a publicaciones de origen científico que, sin embargo, se centran en aspectos específicos de la metodología de producción. Además, están orientadas a un público concreto y, por tanto, no cubren las necesidades del amplio espectro de usuarios interesados en este tipo de datos LULC.

Finalmente, en lo que se refiere a la precisión de estas bases de datos, esta no suele ser muy alta. Se suelen mover, para todo el conjunto del área cartografiada, entre un 65 y un 85% de precisión (Pérez-Hoyos et al. 2017).

7.2.2.2. Fuentes temáticas LULC

Los productos de orientación temática permiten llevar a cabo el estudio de ciertas coberturas con mayor precisión. Son mayoritarios a este respecto los mapas destinados a cartografiar las áreas forestales (Tabla 7.3). Sólo el GHSL tiene como objetivo principal la cartografía de otras coberturas que no sean vegetales.

A escalas globales los productos son generalmente obtenidos a partir de procedimientos automáticos de clasificación, que permiten cartografiar grandes extensiones con poco coste y elevada precisión. Usos y coberturas de índole urbana y agrícola son muy heterogéneos como para ser correctamente clasificados a partir de este tipo de métodos, especialmente cuando se requiere información de detalle. De ahí que el único mapa temático global para usos diferentes a la vegetación natural sea el GHSL. Éste, además, proporciona escaso detalle temático. Tan sólo diferencia entre suelos artificiales y aquellos no sellados. Su principal ventaja reside en su resolución y extensión temporal: cuatro fechas entre 1974 y 2014 (Tabla 7.3). Es así, de todos los productos analizados a escala global, el que se remonta en el tiempo a una fecha más lejana.

Los métodos de producción de estos mapas temáticos suelen ser más variados que los utilizados para el caso de los mapas LULC generales. Incorporan distintas técnicas como árboles de regresión, redes neuronales e, incluso, llegan a llevar a cabo la clasificación de imágenes radar. Además, se encuentran más automatizados. Con la excepción del FCover, el método de producción no suele contar con un paso específico de revisión experta de los resultados obtenidos. Esto hace que los mapas finalmente obtenidos sean

notablemente dependientes de la precisión del método de clasificación utilizado. La incertidumbre de éste se plasmará directamente en el mapa final. El análisis de la incertidumbre asociada a los métodos de producción es, por tanto, de vital importancia en este tipo de productos.

Las fuentes cartográficas de orientación temática suelen proporcionar más detalle, tanto temático, como espacial y temporal, que las fuentes cartográficas generales LULC. Para el uso o cobertura que cartografían en detalle incluyen generalmente información a nivel de subpíxel: lo habitual es que indiquen el porcentaje que la cubierta analizada ocupa en cada celda de la matriz ráster. La resolución espacial suele ser oscilar entre 25 y 300m de tamaño de píxel. Además, la mayor parte de los productos cuentan con series temporales para todo el siglo XXI.

La información técnica de estos productos es, sin embargo, escasa e incompleta, al igual que en el caso de las fuentes LULC globales. Debido a su orientación temática, en muchos casos las guías o artículos científicos que presentan estos productos resultan excesivamente técnicos y difíciles de comprender por parte de un usuario ajeno a la materia. Especialmente por cuanto los métodos de producción empleados suelen ser bastante más complejos y difíciles de entender que aquellos usualmente utilizados para la producción de las bases de datos LULC generales.

7.2.3. FUENTES CARTOGRÁFICAS A ESCALA CONTINENTAL (EUROPA)

7.2.3.1. Fuentes generales LULC

Entre las fuentes cartográficas LULC generales con cobertura para todo el continente europeo, tan sólo nos encontramos con el CORINE Land Cover (CLC) y el PELCOM (Tabla 7.4). Este último comparte características con la mayor parte de los productos LULC globales existentes para fechas similares. Se trata de un producto de baja resolución (1km), con una única edición y obtenido a partir de técnicas de clasificación digital, supervisada o no supervisada. Por tanto, su utilidad no es especialmente significativa.

Al contrario, la metodología de producción CORINE, obtenido a nivel regional, a partir de fotointerpretación a una escala de cierto detalle y, por tanto, con una importante participación de conocimiento experto, lo hacen una fuente de referencia para el estudio del continente europeo. Su principal fortaleza reside en su actualización continua bajo la coordinación de la Agencia de Medio Ambiente Europea (*European Environmental Agency*, EEA).

Aunque la producción regional facilita la generación de un producto de detalle adaptado a las necesidades específicas de cada país, cuenta también con inconvenientes a la hora de generar una base de datos coherente para toda Europa. De este modo, si bien la leyenda y las especificaciones técnicas son las mismas para todos los países que forman parte de CORINE, cada equipo de producción introduce ciertas modificaciones para adaptar CLC a la realidad geográfica del país, como se ha hecho en Noruega

Tabla 7.3. Relación de fuentes cartográficas LULC globales de componente temático

	GHSL	FCover	Landsat VCF	MODIS VCF	Hansen forest map	Global Forest Non Forest Map (FNF)	
Temática	Urbano	Vegetación	Forestal	Forestal	Forestal	Forestal	
Producto	Mapa de áreas urbanas (urbano / no urbano)	Mapa indicando el % de cada píxel ocupado por cubierta vegetal	Mapa indicando el % de cada píxel ocupado por cubierta forestal	Mapa indicando el % de cada píxel ocupado por (1) cubierta forestal	Mapa de porcentaje del dosel arbóreo y mapa de ganancias y pérdidas anuales	Mapa de áreas forestales (forestal / no forestal)	
Escala de trabajo	A nivel de escena / Continental	Global	Global	Global	Continental	Regional	
Obtención (según el método más reciente empleado)	Método principal	Clasificación supervisada	Redes neuronales	Modelo basado en árboles de decisión (regresión)	Clasificación supervisada	Clasificación supervisada	Clasificación de imágenes radar
	Otros métodos	Clasificación no supervisada a escala continental	-	-	-	Procesamiento específico adicional para determinar las ganancias y pérdidas forestales	-
	Fuentes base	Sensores Landsat	Sensores PROVA-V y VEGETATION	MODIS VCF, sensores Landsat y MODIS cropland	Sensor MODIS	Sensores Landsat	Sensores radar PALSAR y PALSAR-2
	Revisión experta	No	Sí	No	No	No	No
	Cambios metodológicos	Sí	Sí		Sí	Sí	
Escala / Resolución espacial	38m / 250m / 1km	300m / 1km	30m	250m (actual) / 500m (ediciones anteriores a las Colección 3)	30m	25m / 100m / 1km / 0.25 grados MMU: 0.5ha	
Leyendas admitidas	-	-	-	-	-	-	
Nº total de clases	Urbano / No Urbano hasta 2014 18 clases en 2014	% del píxel ocupado por la cobertura vegetal	% del píxel ocupado por cubierta forestal y 4 clases más	% del píxel ocupado por cubierta forestal y 2 clases más	-	Forest / Non Forest y 2 clases más	
Clases artificiales (a); agrícolas (ag); vegetación (v); mosaico (m) y error / sin datos (na)	Clases no asimilables a una clasificación normal. Varias delimitadas únicamente según valores de reflectividad	-	0 (a), 0 (ag), 0 (v), 0 (m), 2 (na)	0 (a), 0 (ag), 0 (v), 0 (m), 1 (na)	-	0 (a), 0 (ag), 1 (v), 0 (m), 1 (na)	
Resolución temporal	4 fechas (74, 90, 00 y 14)	Cada 10 días (99-Actualidad [1km], 14-Actualidad [300m])	4 fechas (00, 05, 10, 15)	Anual para el periodo 00-15 Prevista actualización	Una fecha para porcentaje del dosel (00); Anual para ganancias y pérdidas (periodo 00-16)	6 fechas (07, 08, 09, 10, 15, 16) Prevista actualización	
Referencia [1] / descarga [a] **	[18] [l]	[19] [m]	[20] [n]	[21] [ñ]	[22] [o]	[23] [24] [p]	

*UMC: Unidad Mínima Cartografiada ** Véase el Anexo 3 // Las fuentes cartográficas se encuentran ordenadas con acuerdo a la fecha para la que muestran información, desde la que incluye el mapa más antiguo, hasta la más actual. Fuente: Elaboración propia

para el caso de las clases agrícolas (Aune-lundberg y Strand 2010). En este sentido, la geografía de un continente paisajísticamente tan diverso como el europeo resulta difícil de cartografiar bajo los mismos criterios, lo que supone un importante desafío técnico y conceptual.

A diferencia de los otros productos analizados hasta el momento, el CLC cuenta con clases mixtas difíciles de interpretar, como el mosaico de cultivos (*complex cultivation patterns*), el bosque mixto o los terrenos principalmente agrícolas con importantes espacios de vegetación natural. A falta de criterios puramente objetivos para su clasificación, la interpretación de estas clases queda en última instancia en manos del fotointérprete y, por ende, de su subjetividad. En consecuencia, el mapeo de estas clases lleva asociado un importante grado de incertidumbre (Valcárcel Sanz y Castaño Fernández 2012).

Recientemente, gran parte de los países europeos han obtenido CORINE Land Cover a partir de la generalización y combinación de cartografías de mayor detalle (Hazeu et al. 2016). Es una consecuencia de los postulados de la directiva INSPIRE, que aboga por la reutilización de los datos espaciales de mayor detalle para la obtención de datos a menores escalas (cartográficas) (Valcárcel et al. 2008). Los métodos utilizados para obtener el CLC por generalización y combinación de datos nacionales son distintos para cada país (Solbjørg et al. 2010; Lydon y Smith 2014; Hazeu et al. 2016). También son distintas las características de las bases de datos nacionales a partir de las cuáles se generaliza el CORINE Land Cover (Manakos y Braun 2014). En consecuencia, la realidad representada bajo la misma clase CLC para cada uno de los países puede ser muy diferente.

Cambios metodológicos como los apuntados han generado inconsistencias en la serie temporal de mapas CORINE Land Cover para algunos países como Alemania o Irlanda (Hovenbitzer et al. 2014; Lydon y Smith 2014). Esto provoca cambios de origen técnico, no real, que impiden la utilización directa de los mapas LULC CORINE en distintas fechas para analizar los cambios en la ocupación del suelo. El cambio metodológico previsto a nivel europeo para la próxima edición de CORINE Land Cover en 2018 (CLC+, CORINE segunda generación) puede implicar problemas similares, si bien se ha asegurado que se mantendrá la coherencia de los nuevos mapas con los ya existentes hasta el momento (Kleeschulte et al. 2017).

A escala continental, pero sin cubrir toda Europa, encontramos otro conjunto de mapas, originados como parte del programa Copernicus y que tienen como finalidad cartografiar de manera precisa algunos ámbitos concretos del continente europeo, como las áreas urbanas, las zonas riparias y los espacios incluidos dentro de la red Natura 2000 (Tabla 7.4). A diferencia de CORINE Land Cover, se obtienen a partir de clasificaciones digitales de teledetección, generalmente supervisadas y, por tanto, con participación de conocimiento experto. De hecho, en el caso del Urban Atlas, se llega a hacer uso de tareas de fotointerpretación.

Estos mapas proporcionan un detalle espacial mucho mayor que el del CLC (0.25ha de unidad mínima cartografiable frente a las 25ha de CORINE Land Cover). El detalle temático es, en general, menor. No obstante, el *Urban Atlas* sí ofrece más información

Tabla 7.4. Relación de fuentes cartográficas LULC continentales

		CORINE Land Cover	PELCOM	Urban Atlas	N2K	Riparian Zones
Producto		Mapa LULC y mapa de cambios LULC	Mapa LULC	Mapa LULC y mapa de cambios LULC	Mapa LULC y mapa de cambios LULC	Mapa LULC
Escala de trabajo		Regional	Regional	Continental	Continental	Continental
Cobertura		Europa (UE)	Europa (UE)	Áreas urbanas funcionales (FUA) de Europa (UE)	Espacios de la Red Natura 2000 de Europa (UE)	Zonas riparias de Europa (UE)
Obtención (según el método más reciente empleado)	Método principal	Fotointerpretación	Clasificación supervisada / no supervisada según criterio de cada equipo regional	Clasificación supervisada	Clasificación supervisada	Clasificación supervisada
	Otros métodos	Generalización cartográfica / Fusión de datos	Cartografía individual de clases específicas	Fotointerpretación	-	-
	Fuentes base	Sensor LISS III y satélite RapidEye / Mapas nacionales	Sensor AVHRR	Base de datos VHR2 (Copernicus)	Base de datos VHR2 (Copernicus)	Base de datos VHR2 (Copernicus)
	Revisión experta	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
	Cambios metodológicos	Sí	-	Sí	No	-
Formato		Vectorial y Ráster	Ráster	Vectorial	Vectorial	Vectorial
Escala / Resolución espacial		1:100.000 / UMC: 25ha UMC cambios: 5ha AMC: 100m	1km	UMC: 0.25-1ha UMC cambios: 0.1-0.25ha	UMC: 0.5ha / AMC: 10m	UMC: 0.5ha / AMC: 10m
Leyendas admitidas		CORINE	PELCOM (dos niveles)	Urban Atlas	N2K	
Nº total de clases		44	16 (nivel más detallado)	27	11	11
Clases artificiales (a); agrícolas (ag); vegetación (v); mosaico agrícola / vegetación (m) y error / sin datos (na)		11 (a), 9 (ag), 8 (v), 2 (m), 0 (na)	1 (a), 3 (ag), 6 (v), 0 (m), 1 (na)	17 (a), 4 (ag), 2 (v), 1 (m), 0 (na)	1 (a), 1 (ag), 3 (v), 0 (m), 1 (na)	1 (a), 1 (ag), 3 (v), 0 (m), 1 (na)
Resolución temporal		4 fechas (90, 00, 06, 12) Prevista actualización	Una única fecha (97)	2 fechas (06, 12) Prevista actualización	2 fechas (06, 12) Prevista actualización	Una única fecha (13)
Referencia [1] / descarga [a] **		[25] [q]	[26] [r]	[27] [s]	[28] [t]	[29] [u]

*UMC: Unidad Mínima Cartografiada AMC: Anchura Mínima Cartografiada ** Véase el Anexo 3 // Las fuentes cartográficas se encuentran ordenadas con acuerdo a la fecha para la que muestran información, desde la que incluye el mapa más antiguo, hasta la más actual. Fuente: Elaboración propia

temática que el CORINE Land Cover para el caso de las coberturas de origen artificial, diferenciando distintas densidades de urbanización

En este sentido, el *Urban Atlas* se encuentra a medio camino entre su consideración como mapa LULC general y un mapa de orientación temática. Jaffrain et al. (2016) y Montero et al. (2014) realizan una profusa descripción de las características de esta base de datos.

Estos productos a escala continental, pero de cobertura limitada, ofrecen coherencia metodológica para toda el área cartografiada. De este modo, no cuentan con las inconsistencias regionales mostradas para CORINE, que introducen incertidumbres en la utilización de tal producto para estudios a nivel continental. Sin embargo, a diferencia de CLC, estos mapas cuentan con una serie temporal muy corta, que se remonta, en el mejor de los casos, al año 2006. No obstante, está garantizada su actualización futura y, de hecho, se espera que su producción se integre como parte de la nueva estrategia de generación y actualización de CORINE Land Cover (Kleeschulte et al. 2017).

La información técnica es abundante y de calidad para todos los productos LULC continentales. Se encuentra disponible en todos los casos, salvo el PELCOM, en el portal web del programa Copernicus (<http://land.copernicus.eu/>). No obstante, para el caso del CORINE Land Cover, si bien contamos con bastante información técnica a nivel europeo, en relación con las tareas de coordinación llevadas a cabo por la EEA, aún es escasa la información a escala nacional, en relación con las diferentes tareas emprendidas por cada equipo de producción. Para algunos países, como Noruega o Irlanda, existe bastante información al respecto (Aune-lundberg y Strand 2010; Aune-Lundberg y Strand 2010; Solbjørg et al. 2010; Lydon y Smith 2014). Sin embargo, en otros casos, como España, no contamos con reportes del procedimiento llevado a cabo para la obtención de CLC en nuestro país, ni sobre su validez.

Finalmente, en lo que se refiere a la precisión, esta es especialmente baja en el caso del PELCOM (69.2%) (Mücher 2000). Es incluso inferior a la de otros productos LULC a escala global, lo que es seguramente debido a las especificidades de su leyenda, con un detalle temático similar para todas las coberturas, y sin un enfoque tan claro en la vegetación natural como en el caso de los productos LULC globales anteriormente analizados. El CORINE Land Cover, por otro lado, presenta una precisión mucho más alta, en torno al 80-90% (Maucha y Buettner 2005; Jaffrain 2017), debido a su mayor detalle, producción a nivel regional y, en muchos casos, obtención por fotointerpretación. También es muy alta, superior al 90%, la precisión del resto de mapas LULC continentales de cobertura limitada, pero producción a nivel continental (Sannier 2016, 2017; Gallaun 2017).

7.2.3.2. Fuentes temáticas LULC

Las fuentes cartográficas LULC de orientación temática a nivel continental para el caso de Europa son menos numerosas que los existentes a escala global, si bien cuentan con

información mucho más detallada (Tabla 7.5). Distinguimos así entre dos productos principales: las *High Resolution Layers* y el *European Settlement Map*. A diferencia de los mapas temáticos a nivel global, no se ocupan únicamente de las coberturas vegetales. Al contrario, la única cobertura analizada por los dos productos analizados es el suelo artificial.

Ambos mapas muestran información sobre las coberturas a nivel de subpíxel: porcentaje de la cobertura presente en cada píxel. La principal diferencia entre ambos para el caso de los mapas mostrando la cubierta artificial se encuentra en la resolución espacial (2.5m frente a 20m) y la extensión y resolución temporal del producto. Mientras que las *High Resolution Layers* cuentan con una serie temporal de tres fechas para la cobertura artificial, el *European Settlement Map* tan sólo incluye esta información para el año 2012, no previéndose una actualización sistemática del mismo (<https://land.copernicus.eu/pan-european/GHSL/european-settlement-map>). Esto sí ocurre en el caso de las *High Resolution Layers* (HRL).

Tabla 7.5. Relación de fuentes cartográficas LULC continentales de orientación temática

		High Resolution Layers (HRL)	European Settlement Map
Temática		Superficies artificiales / Forestal / Humedales / Cuerpos de agua	Áreas urbanas
Producto		Mapa indicando el % de cada píxel ocupado por las cubiertas analizadas	Mapa indicando el % de cada píxel urbanizado
Escala de trabajo		Continental	Continental
Cobertura		Europa (UE)	Europa (UE)
Obtención (según el método más reciente empleado)	Método principal	Clasificación supervisada	Clasificación no supervisada
	Otros métodos	-	-
	Fuentes base	Base de datos Image 2012 (Copernicus)	Satélites SPOT
	Revisión experta	Sí	No
	Cambios metodológicos	Previstos	Sí
Formato		Ráster	Ráster
Escala / Resolución espacial		20m / 100m	2.5m / 10m / 100m
Leyendas admitidas		-	-
Nº total de clases		% del píxel ocupado por cada cobertura El mapa <i>Forest type</i> diferencia dos clases: bosques de coníferas y bosques de frondosas	% del píxel urbanizado En la edición de 2017 (también para 2012) distingue entre 8 clases
Clases artificiales (a); agrícolas (ag); vegetación (v); mosaico agrícola / vegetación (m) y error / sin datos (na)		-	7 (a), 0 (ag), 0 (v), 0 (m), 0 (na) [2017]
Resolución temporal		Cobertura artificial: tres fechas (06, 09, 12); Resto de coberturas: una única fecha (12) Prevista actualización	Una única fecha (12)
Referencia [1] / descarga [a] **		[30] [v]	[31] [w]

** Véase el Anexo 3 // Las fuentes cartográficas se encuentran ordenadas con acuerdo a la fecha para la que muestran información, desde la que incluye el mapa más antiguo, hasta la más actual. Fuente: Elaboración propia

No obstante, incertidumbres asociadas al método de clasificación utilizado impiden la comparación directa de la serie temporal existente de las HRL (Langangke 2015). Además, varios autores han señalado importantes limitaciones en la capa referida a los usos artificiales de las High Resolution Layers (HRL) (Hurbánek et al. 2010; Krówczyńska et al. 2016). De hecho, Hurbánek et al. (2010) plantea en su análisis que, pese a las características de esta base de datos, a menudo la información sobre el grado de sellado del suelo

se recoge de manera binaria. Es decir, el porcentaje de suelo artificial presente en cada pixel tiende a adquirir únicamente valores de 0 o 100%, sobreestimando o infraestimando la cobertura real.

Además, la validación de este producto es diferente según el país. En este sentido, mientras en algunos casos los equipos nacionales han llevado a cabo la validación y mejora del producto, en otras ocasiones tal tarea ha sido realizada por la empresa encargada de su producción (Büttner et al. 2016), lo que puede originar diferencias en el producto final conseguido. Por tanto, si bien de acuerdo con la información técnica suministrada en el portal Copernicus, la precisión de estos mapas temáticos es buena, existen importantes limitaciones que deben ser correctamente estudiadas para valorar la confiabilidad de estos mapas. También se debe proporcionar al usuario más información acerca de las posibles disfuncionalidades de la base de datos.

7.2.4. FUENTES CARTOGRÁFICAS A ESCALA NACIONAL (ESPAÑA)

7.2.4.1. Fuentes generales LULC

Hasta el año 2005, con la producción de la primera edición de SIOSE, no existía en España una base de datos de usos y coberturas del suelo exclusivamente nacional (Valcárcel Sanz y Castaño Fernández 2012). El papel de ésta lo ejerció hasta entonces el CLC. De hecho, el CORINE Land Cover cuenta en España para las ediciones de 1990 y 2000 con un mayor desarrollo temático (85 clases) y excepciones en la unidad mínima cartografiable para las superficies de agua y las áreas artificiales (Catalá Mateo et al. 2008).

Previos a los productos anteriores cabe mencionar el Mapa Topográfico Nacional y el Catastro, de cuya producción y características hace una breve mención Valcárcel Sanz y Castaño Fernández (2012). Si bien no se constituyen como bases de datos LULC, estas cartografías sí incluyen información sobre la ocupación del suelo, de utilidad para estudios de detalle y cuyo horizonte temporal se retrotraiga en el tiempo más allá de la extensión cubierta por SIOSE o CORINE Land Cover.

En todos los casos hablamos de mapas obtenidos a partir de tareas de fotointerpretación, generalmente de foto y ortofotografía aérea, con una importante participación de conocimiento experto.

El SIOSE se caracteriza por poseer un modelo de datos diferente al tradicionalmente empleado por el CLC y la mayor parte de las cartografías LULC que hemos revisado hasta el momento. Éstas siguen un modelo de datos jerárquico, también llamado sistema clasificatorio (Delgado Hernández 2016), en el que el área cartografiada es delimitada en varios polígonos homogéneos, a los que se asigna una única cobertura (Valcárcel Sanz y Castaño Fernández 2012). Al contrario, el modelo de datos orientado a objetos, también denominado sistema descriptivo (Delgado Hernández 2016), indica para cada polígono dibujado la relación de coberturas que componen el mismo (Valcárcel Sanz y Castaño Fernández 2012).

En consecuencia, el SIOSE proporciona información a nivel de polígono, diferenciando las distintas coberturas que componen éste. Además, muestra gran detalle en la información que suministra, tanto espacial (UMC 0.5-2ha) como temático (39 clases simples y 45 clases compuestas). A diferencia de otras fuentes cartográficas estudiadas en este capítulo, distingue claramente entre usos y coberturas, si bien las distintas ediciones de SIOSE producidas hasta el momento sólo proporcionan información sobre las coberturas (Equipo Técnico Nacional SIOSE 2015).

Tabla 7.6. Relación de fuentes cartográficas LULC nacionales (España)

	Mapa forestal	Mapa de cultivos y aprovechamientos	SIOSE
Temática	Forestal	Agrícola	General
Producto	Mapa LULC junto a tabla de atributos especificando para cada polígono (MFE25; MFE50) sus características vegetales y climáticas. El MFE25 sigue un modelo de datos multiparámetro.	Mapa LULC	Mapa LULC junto a tabla de atributos especificando las proporciones de cada uno de los elementos representados en cada polígono (modelo orientado a objetos)
Escala de trabajo	Equipo nacional / regionales	Equipos regionales para cada CCAA	Equipos regionales para cada CCAA
Obtención (según el método más reciente empleado)	Método principal	Fotointerpretación	Fotointerpretación
	Otros métodos	Trabajo de campo	-
	Fuentes base	Fotografía aérea / Ortofoto	Fotografía aérea / Ortofoto
	Revisión experta	Sí	Sí
Cambios metodológicos	Sí (cambios metodológicos en cada escala)	Sí	Sí (no significativos; de detalle)
Formato	Vectorial	Vectorial	Vectorial
Escala / Resolución espacial	1:25.000 / UMC 0-5-2ha (MFE25); 1:50.000 (MFE50); 1:200.000 (MFE200); 1:400.000 (MFE400) Cada uno obtenido de manera independiente Prevista actualización de MFE25 y MFE50 (cada 10 años)	1:50.000	1:25.000 UMC: 0.5-2ha / UMC cambios: 0.4ha / AMC: 15m, con excepciones
Nº total de clases	22 (MFE400) / En el resto de ediciones más de 10000 clases diferentes	10	39 clases simples y 45 clases compuestas (constituídas a partir de la asociación de clases simples)
Clases artificiales (a); agrícolas (ag); vegetación (v); mosaico (m) y error / sin datos (na)	Principalmente desarrollo de las clases para los distintos tipos de vegetación	0 (a), 6 (ag), 3 (v), 0 (m), 0 (na)	Clases simples: 7 (a), 8 (ag), 4 (v), 0 (m), 0 (na) Clases compuestas: 41 (a), 4 (ag), 0 (v), 0 (m), 0 (na)
Resolución temporal	Una única fecha, diferente según la parte del territorio considerada: 66 (MFE400); 86-97 (MFE200); 97-07 (MFE50); 07-Actualidad (MFE25). Las imágenes base no se corresponden generalmente con todo el periodo de producción, sino con uno o varios años	Dos fechas, las cuales son diferentes según la parte del territorio considerada: 70-90 (sobre vuelo de los años 40) y 00-10	Tres fechas: 05, 09, 11. Prevista actualización (cada tres años)
Referencia [1] / descarga [a] **	[x]	[y]	[32] [x]

*UMC: Unidad Mínima Cartografiable; AMC: Anchura Mínima Cartografiable ** Véase el Anexo 3 // Las fuentes cartográficas se encuentran ordenadas de acuerdo con la fecha para la que muestran información, desde la que incluye el mapa más antiguo, hasta la más actual. Fuente: Elaboración propia.

Su principal problema proviene del difícil manejo de su base de datos. No todos los polígonos quedan definidos por una cobertura dominante. En el caso de aquellas coberturas compuestas que no tienen un significado previamente atribuido (coberturas compuestas

no predefinidas), el usuario sólo cuenta con información sobre los elementos que integran el polígono, sin proporcionársele una etiqueta o cobertura que defina globalmente todo ese polígono. Para conseguir ésto, es necesario realizar un tratamiento de la base de datos, como el propuesto por Delgado Hernández (2016). Este procedimiento, sin embargo, complica el manejo de la base de datos e introduce una inevitable incertidumbre, fruto del procesamiento realizado, la cual debe de ser estudiada y considerada por el usuario final.

Al igual que CORINE Land Cover, la producción de SIOSE se realiza a nivel regional. En este sentido, se pueden señalar diferentes criterios y métodos de producción según la Comunidad Autónoma considerada. Mientras Andalucía o Cataluña han obtenido SIOSE a partir de la generalización de cartografías de mayor detalle (Burriel Moreno et al. 2008; Gil et al. 2010), en otras comunidades, como Asturias, esta cartografía se ha obtenido de cero a partir de tareas de fotointerpretación (Valcárcel Sanz y Castaño Fernández 2012). Fernández Noguerol (2017) señala también como el nivel de desagregación de la leyenda es distinto en función de la Comunidad Autónoma considerada. Por tanto, al igual que en el caso de CLC, la utilización de SIOSE a nivel nacional puede acarrear importantes incertidumbres, en función de los criterios seguidos en cada equipo de trabajo para asignar ciertas coberturas a cada categoría de la leyenda propuesta a nivel nacional.

El cambio metodológico previsto en la generación de SIOSE a partir de 2018 (Delgado Hernández et al. 2017) puede dar solución a parte de esas contradicciones. En este sentido, se prevé la generación de SIOSE a partir de la información contenida en bases de datos nacionales temáticas de gran detalle como el catastro, SIGPAC o el Mapa Forestal (Delgado Hernández et al. 2017). Sin embargo, esto puede poner fin a la escasa serie temporal de datos SIOSE actualmente disponible (2005-09-11) y, por tanto, limitar la utilización de esta base de datos para el estudio de los cambios en la ocupación del suelo en España.

Al igual que para el caso del CORINE Land Cover, tanto la información técnica como la validez y precisión del producto son buenos, de acuerdo con la información suministrada por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) a nivel nacional. Sin embargo, a nivel regional, solo algunas Comunidades Autónomas suministran información sobre la forma de producción y la validez del SIOSE creado por su equipo regional. Para el caso de Asturias, no contamos con información de este tipo.

7.2.4.2. Fuentes temáticas LULC

Podemos mencionar, para España, dos fuentes cartográficas LULC de orientación temática que cubren todo el territorio nacional: el mapa forestal y el mapa de cultivos y aprovechamientos (Tabla 7.6). Existen otros proyectos inconclusos que han intentado perseguir objetivos similares, como el caso del Mapa Agronómico Nacional (Valcárcel Sanz y Castaño Fernández 2012). En otros casos, como el del Atlas de los Hábitats Naturales y Seminaturales de España (Morillo Fernández 2003), el objetivo, enfoque y características

del proyecto, que ni siquiera cartografía de manera sistemática todo el territorio nacional, impide considerar este producto como un producto LULC al uso.

Respecto a las fuentes analizadas, éstas muestran notables diferencias entre sí. Aunque el método de producción es similar en ambos casos, a partir de fotointerpretación de fotografía aérea y con una importante participación de conocimiento experto, en el caso del Mapa Forestal a partir de labores de campo, el detalle temático y espacial de los dos mapas es muy diferente. El Mapa de Cultivos y Aprovechamientos tan sólo distingue 10 clases, definidas de acuerdo con su diferente aprovechamiento agrícola. El Mapa Forestal, por su parte, en sus ediciones más detalladas (1:25.000 y 1:50.000), distingue una enorme variedad de formaciones vegetales distintas, proporcionando un detalle temático incomparable al de ninguno de los mapas descritos hasta el momento. Cada polígono delimitado queda definido por una gran variedad de atributos, que lo caracterizan vegetal y climáticamente.

En lo que respecta al detalle espacial, mientras el Mapa de Cultivos y Aprovechamientos solo se encuentra realizado a una escala (1:50.000), el Mapa Forestal se ha realizado a cuatro escalas distintas (Tabla 7.6), si bien cada una de acuerdo con un procedimiento de obtención diferente.

Consecuencia de su gran detalle espacial y, especialmente, temático, ninguna edición del Mapa Forestal de España cuenta con una actualización, aunque está previsto llevarla a cabo para los mapas a escalas 1:50.000 y 1:25.000. Por su parte, el Mapa de Cultivos y Aprovechamientos sí cuenta con dos ediciones distintas. Sin embargo, han sido realizadas bajo distintos equipos y formas de producción, lo que impide su comparación para el estudio de los cambios en la ocupación del suelo.

Los dos mapas temáticos analizados, producidos por el Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, o sus predecesores, carecen de información técnica asociada actualizada y de detalle. En este sentido, la utilización de estos mapas puede conllevar una alta incertidumbre, consecuencia del desconocimiento de la mayor parte de sus características o formas de producción. De igual modo, su precisión, aunque muy alta, no ha podido ser tampoco ratificada debido a la escasa información técnica disponible.

7.2.5. FUENTES CARTOGRÁFICAS A ESCALA REGIONAL (ASTURIAS)

No encontramos a nivel regional, para el caso de Asturias, ninguna cartografía que realice una descripción sistemática de los usos y coberturas del suelo para el conjunto de la Comunidad Autónoma. Esta función la desempeña, desde el 2005, el SIOSE.

Existen mapas temáticos, que recogen información sobre la vegetación y cultivos de Asturias. No obstante, prácticamente no se proporciona información sobre sus características, métodos de obtención, etc. Esto nos impide llevar a cabo una caracterización de estos mapas similar a la realizada para todos los casos anteriores.

Para el Principado de Asturias, existe un mapa de vegetación a escala 1:25.000, realizado durante el periodo 1989-1998. Según el área considerada, la fecha de las coberturas analizadas es distinta. De forma más reciente, en el año 2010, se ha publicado el Mapa de Frutales y Cultivos, que cartografía a escala 1:25.000 las plantaciones de manzano y los viñedos de Asturias, haciendo lo propio a escala 1:5000 para los viveros e invernaderos. De manera complementaria, los Mapas Topográficos a escala 1:5000 y 1:10.000 incluyen información sobre la ocupación del suelo, si bien ésta cuenta con poco detalle temático (cuatro clases distintas, referidas a coberturas vegetales).

Solo el Mapa Topográfico a escala 1:5000 cuenta con más de una edición (1994-96 y 2003), con lo que el estudio de los cambios en la ocupación del suelo para Asturias a partir de estos mapas es complicado. Tampoco se ha previsto la actualización de ninguno de los productos anteriores. En consecuencia, éstos sirven como referencia para mostrarnos el estado de parte de los usos y coberturas del suelo de Asturias para una sola fecha, sin permitir llevar a cabo estudios temporales de los cambios en la ocupación del suelo. Esto, unido a la falta de información técnica o de validez de los productos y, por tanto, sobre su incertidumbre, desaconseja su uso con tal fin.

7.3. LIMITACIONES, POTENCIALIDADES Y LÍNEAS DE TRABAJO

La principal limitación de todas las fuentes cartográficas analizadas para el estudio de los cambios en la ocupación del suelo radica en la falta de series temporales históricas. Cuando estas existen, cambios de origen técnico entre los distintos mapas de la serie impiden la utilización completa de la misma para el estudio histórico de los cambios de la ocupación del suelo, como ocurre en el caso del MODISLC o del CLC. En la futura actualización de estas bases de datos, se debe prestar especial atención a la compatibilidad de los nuevos mapas generados con los producidos anteriormente, de tal manera que sea posible establecer comparaciones entre todos los mapas del mismo producto. De este modo, el principal valor de una serie de datos LULC radica en su serie histórica, por lo que garantizar el mantenimiento de ésta debe de ser una tarea preferente.

De cara a proporcionar al usuario la máxima información sobre la incertidumbre de los productos LULC, de tal manera que éste sea consciente de sus limitaciones, es necesaria más y mejor información técnica sobre la precisión y métodos de obtención de estas bases de datos. Esta es aún escasa para el caso de los productos globales, y prácticamente inexistente para el caso de las fuentes regionales desarrolladas por el Servicio de Información Geográfica del Principado de Asturias o las nacionales promovidas por el Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. Para el caso del resto de fuentes a nivel continental y nacional, aunque en general se proporciona bastante información, se debe trabajar en su comunicación. Se debe de comunicar de manera clara las incertidumbres asociadas a estos productos, organizando los documentos de tal manera que el usuario es rápidamente consciente de las características y limitaciones de las bases de datos con las que trabaja. El lenguaje utilizado debe ser, asimismo, lo más claro posible.

En lo que respecta a la precisión y validez de estas bases de datos, ésta suele ser mucho mayor para el caso de las fuentes regionales, nacionales y continentales que para las fuentes globales. En este sentido, las primeras cuentan con una mayor participación de conocimiento experto, métodos de obtención más complejos o estrategias de validación más intensivas. No obstante, en ningún caso la precisión tiende a superar el 95%. Los cambios LULC que tienen lugar suelen afectar a una escasa porción de la superficie terrestre, que puede ser inferior a un 5% de la misma. En consecuencia, los cambios detectados por la fuente utilizada pueden estar afectados por una gran incertidumbre (Pontius Jr. y Lippitt 2006), la cual será mayor para el caso de las bases de datos a escala global o continental, con niveles de precisión que se suelen mover entre un 65 y un 85% (Pérez-Hoyos et al. 2017). De este modo, el estudio de los cambios en la ocupación del suelo a partir de fuentes cartográficas LULC contiene importantes incertidumbres, que deben ser consideradas.

Las medidas de precisión de las bases de datos LULC se suelen referir al conjunto del área cubierta por las mismas, sin hacer referencia a regiones o coberturas específicas. El buen ajuste de la base de datos con la realidad para el conjunto del área representada puede esconder importantes desacuerdos en algunos ámbitos o para algunas clases (Fassnacht et al. 2006; Castilla y Hay 2007), especialmente en el caso de aquellos más heterogéneos. De esta manera, debe analizarse la forma en la que cada fuente cartografía el ámbito de estudio escogido y las coberturas y usos en él presentes. Solo así se puede lograr un conocimiento adecuado de las limitaciones de las fuentes cartográficas LULC con las que se está trabajando.

La comparación de varias fuentes, de diferente temática y obtenidas según distintas metodologías, se ha señalado como un buen método para estudiar y analizar la incertidumbre en la representación de los usos y coberturas del suelo por parte de una determinada base de datos (Giri et al. 2005; Tchuenté et al. 2011; Pérez-Hoyos et al. 2012). En este sentido, la realización de trabajos comparativos de distintas fuentes, según diferentes temáticas de estudio y para distintas zonas de trabajo, se puede considerar como una importante línea de trabajo que necesita seguir siendo desarrollada. Del mismo modo, la generación de datos a partir de distintas bases de datos ha sido señalada como una forma de combatir la incertidumbre, aprovechando así las fortalezas de cada uno de los productos utilizados (Verburg et al. 2011). No obstante, no resulta esto especialmente útil para la creación de series temporales LULC y, por ende, tampoco para el estudio de los cambios en la ocupación del suelo.

Finalmente, una de las principales contradicciones entre las distintas fuentes cartográficas, incluso cuando se utilizan similares leyendas, es la interpretación de categorías semejantes de forma diferente (Pérez-Hoyos et al. 2012; Sexton et al. 2015). Un estudio del significado de cada categoría para cada base de datos, así como la utilización de leyendas comunes a cada escala, que garanticen la compatibilidad entre los distintos productos, es otro de los pasos necesarios a realizar en la consecución de cartografías LULC de calidad y comparables entre sí.

7.4. ¿QUÉ FUENTE SELECCIONAR?

Existe una gran variedad de fuentes cartográficas para el estudio de los cambios de la ocupación del suelo. Muchas de ellas son complementarias, al realizarse a distintas escalas y, por tanto, con diferente nivel de detalle, así como, en algunos casos, con una distinta finalidad temática.

En función del objetivo de nuestro estudio, una u otra fuente puede ser más apropiada. Fuentes a escala global proporcionan cobertura para todo el globo de manera coherente, con datos a la misma resolución espacial, temática y que siguen el mismo o similares métodos de obtención. Son así las fuentes preferibles en el caso de estudios globales que no demanden gran detalle, ni espacial ni temático. No obstante, aquellas bases de datos obtenidas por agregación de otras, como el FAO-GLCShare o el GeoWiki Hybryd, carecen de esta coherencia técnica para todo el globo. Por tanto, no resultan útiles para estudios que cubran toda la tierra, sino tan solo como fuente de referencia para el estudio de la ocupación del suelo. De este modo, su uso a nivel global tiene asociado todas las incertidumbres de cada una de las bases de datos de origen, así como de aquellas que aparecen consecuencia de la interacción de las incertidumbres de cada una de ellas.

A escala continental, nacional y regional aparecen, en general, fuentes de mayor detalle y precisión. Suelen contar con métodos de obtención más complejos y un mayor respaldo de conocimiento experto, que suele participar en la mayor parte de las etapas de creación de estos datos, especialmente cuando son obtenidos por fotointerpretación. En este sentido, la selección de una u otra fuente debe venir determinada por el nivel de detalle requerido, que a su vez dependerá del objetivo de nuestro estudio.

En general, según la extensión del área de estudio, uno u otro nivel de detalle debe de ser seleccionado. No obstante, cuando se trabaja a escalas similares, especialmente en el caso de las regionales, el nivel de detalle elegido puede ser seleccionado de acuerdo con los usos o coberturas objeto de estudio y su comportamiento sobre la superficie terrestre. Usos y coberturas genéricos y extendidos por todo el ámbito de estudio, que definen la mayor parte del territorio analizado, y que tan sólo pretendemos caracterizar de un modo global, pueden ser estudiados mejor a partir de fuentes de menor detalle como el CORINE Land Cover. Al contrario, usos y coberturas de presencia puntual o que suelen conformar teselas de poca extensión, los cuales queremos estudiar en profundidad, requieren fuentes al mayor detalle posible.

A la hora de seleccionar una u otra fuente también deben de tenerse en cuenta las incertidumbres asociadas a las mismas, especialmente en lo referido al ámbito de estudio y los usos y coberturas que integran éste. Para tal fin, y como se ha comentado anteriormente, la comparación de varias de las fuentes disponibles puede ser una buena solución. También la utilización de las fuentes temáticas como productos de referencia para la validación de las coberturas que cartografían en detalle. De este modo, se trata de productos

que, si bien no ofrecen gran utilidad para estudios que demanden un mapa LULC genérico, sí sirven, por la precisión con la que cartografían ciertas coberturas, como elementos de validación.

Para el caso de esta tesis, el ámbito y las escalas de análisis determinan las posibilidades de selección de las fuentes disponibles. De este modo, el área de estudio se desarrolla a una escala subregional y, por tanto, de detalle. Los cambios en la ocupación del suelo que en ella tienen lugar, si bien significativos con relación al conjunto de la región, no se manifiestan espacialmente de manera generalizada. Al contrario, y consecuencia también de las peculiaridades de la geografía asturiana, ocurren de manera puntual y a partir de transformaciones que, en general, no afectan a grandes extensiones de terreno.

Parte de los objetivos de esta tesis pasan por estudiar la incertidumbre asociada a la selección de una escala de trabajo en la calibración de un modelo de usos y coberturas del suelo. En consecuencia, resulta necesario la selección de dos fuentes a diferentes escalas que, en la medida de lo posible, representen el ámbito analizado bajo los mismos criterios.

Para el caso de Asturias, las únicas fuentes cartográficas LULC generales que cumplen con tales criterios son el CORINE Land Cover y el SIOSE. Cuentan con el detalle necesario como para estudiar el cambio de la ocupación del suelo en el ámbito de estudio y, además, guardan la suficiente coherencia entre sí como para poder ser utilizadas en un estudio comparativo. De este modo, se encuentran disponibles para las mismas fechas y sus leyendas son compatibles. Por tanto, ambas han sido las cartografías seleccionadas para realizar los análisis prácticos que se incluyen en esta tesis.

7.5. CONCLUSIONES

Actualmente, contamos con una gran variedad de fuentes para el estudio de los usos y coberturas del suelo. Éstas se encuentran disponibles a distintas escalas y niveles de detalle. Sin embargo, existen importantes contradicciones entre algunos productos, incluso a la misma escala, lo que nos debe llevar a seleccionar de manera cuidadosa la fuente de trabajo. De este modo, el análisis de la incertidumbre asociada a cada fuente cartográfica empleada en nuestros estudios es un paso esencial previo a la realización de éstos. Como se ha señalado, la comparación de la forma en la que varias fuentes representan el mismo espacio puede ser, en este sentido, una estrategia de validación y de análisis de la incertidumbre.

En el caso de las fuentes seleccionados para esta tesis, se necesita evaluar la incertidumbre asociada a la edición de CORINE Land Cover en Asturias y, específicamente, la derivada de la nueva metodología de producción de CORINE en España, obtenido desde 2005 a partir de la generalización de SIOSE.

Por otro lado, si bien son numerosas las fuentes cartográficas para el estudio de la ocupación del suelo, menores son aquellas que cuentan con una serie temporal de mapas suficientemente larga como para analizar los cambios en tal ocupación. De este modo,

futuras investigaciones deben orientarse a la búsqueda de métodos y procedimientos que permitan la consecución de estas series temporales, evitando los cambios técnicos que, como en el caso de MODISLC o CORINE Land Cover, impiden la comparación de las bases de datos entre las distintas fechas, limitando en gran medida la posible utilidad de estos datos.

Chapter 8

Changes in the methodology used in the production of the Spanish CLC. Uncertainty analysis of the new maps ¹

8.1. INTRODUCTION

Land Use Land Cover (LULC) maps² are extremely useful data, as evidenced by their widespread use in a large number of disciplines, such as Geography. These maps provide information on land occupation, seen as the biophysical cover observed on the Earth's surface (Delgado Hernández 2008). Their use is essential for the study and modelling of territorial dynamics.

There are different sources on land use and land cover for the Spanish territory³. At global and continental levels maps are generated from supervised or unsupervised classification techniques. Some of the most significant at a spatial resolution of 1km are GLC2000, UMD Land Cover Classification and DisCover. The first one was created for the year 2000, and the rest for the period 1992/93. At a finer resolution we can find MODISLC (500m), drawn up yearly since 2000, and GlobCover (300m), with reference date 2005.

For Europe, PELCOM was created from images of the year 1996, with a resolution of 1km. At the national and regional level, CORINE (*Coordination of information on the environment*) Land Cover (CLC) and SIOSE (*Land Cover and Land Use Information System of Spain*) maps stand out, obtained from photointerpretation.

Comparative studies of different LULC maps at the global or continental level (Hansen and Reed 2000; Fritz and See 2005; Giri et al. 2005; McCallum et al. 2006; Herold et al. 2008; Tchuenté et al. 2011), some of which have used CLC (Neumann et al. 2007), have evidenced differences and contradictions between the different sources.

¹ This chapter has been published as a journal article in the *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*.

García-Álvarez D, Camacho Olmedo MT (2017) Changes in the methodology used in the production of the Spanish CORINE: Uncertainty analysis of the new maps. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 63:55–67 . doi: 10.1016/j.jag.2017.07.001

² As stated in the Chapter 3, the word “map” is used here as synonym of spatial dataset. However, in a strict sense, the term “map” just describes the composition obtained after processing, managing and editing geographical information data.

³ For a detailed description of the characteristics of the LULC datasets mentioned in the introduction, refer to Chapter 7.

There are also many studies at the national and regional levels with similar conclusions (Bach et al. 2006; Waser and Schwarz 2006; Pérez-Hoyos and García-Haro 2009; Ran et al. 2010; García Martínez et al. 2015).

In a similar vein, several studies suggest that the accuracy of these maps must be assessed. For CORINE Land Cover, there are several analyses about the errors and confusions of its database (Caetano et al. 2006; Catalá Mateo et al. 2008; Diaz-Pacheco and Gutiérrez 2013; Teixeira et al. 2016), although the uncertainties and limitations of these maps have not been totally specified.

Hence, there is a strong uncertainty linked to the way in which each map includes the information about land use and land cover. Understanding this uncertainty is essential for all research based in these maps, as in the case of Land Use Cover Change (LUCC) modelling (García-Álvarez 2018; Hewitt et al. 2014; Camacho Olmedo et al. 2015). It is therefore necessary to assess the different ways used to produce CLC in different countries and sometimes even within a single country.

Traditionally, CORINE Land Cover has been generated from the photointerpretation of satellite imagery. However, in some countries (Germany, Austria, Finland, Ireland, Iceland, Norway, the United Kingdom, Sweden, Switzerland), especially since CLC06, the map is obtained from generalization techniques of national maps of greater detail (Hazeu et al. 2016). In other cases (Slovakia, Hungary, Poland, etc.), the CORINE map is used to obtain other maps of greater detail, at a 1:50.000 scale, with a minimum mapping unit (MMU) of 4ha and a legend adapted to the geographical specifications of the country (Hazeu et al. 2016). They have even been used to obtain CORINE maps from before 1990 (Feranec et al. 2007). In the case of Spain, CLC90 and CLC00 have a more detailed legend with 85 classes, with exceptions in the MMU (25ha) for water surfaces and artificial areas (Catalá Mateo et al. 2008).

Therefore, there are different ways of producing CLC, each of which can generate a different result. In Germany and Ireland, the methodological change in the production of CORINE Land Cover (from photointerpretation to generalization) has led to the production of new maps, which show important inconsistencies with respect to the previous ones (Hovenbitzer et al. 2014; Lydon and Smith 2014). In the Netherlands, this limitation has been one of the arguments for continuing to produce CORINE Land Cover independently (Büttner 2014; Hazeu et al. 2016).

The recent change in the methodology of production of CLC in Spain (Hazeu et al. 2016) must go hand in hand with studies which show the degree of accuracy of the new CORINE map and its differences with the previous ones. Since the year 2012 CORINE Land Cover has been obtained by generalizing SIOSE, as opposed to the digital photointerpretation technique used until the year 2006. For the same date CLC was obtained using both methods (photointerpretation and generalization). This allows us to compare the CLC obtained through both methods for the same time and place.

This paper aims to compare CORINE Land Cover 2006 for Spain, obtained according to both the methods described above. With this we aim to answer the following

questions: How has the change in production methods affected the information supplied by CLC? Can the new CLC be compared to the previous one? Is it more precise and reliable? How has the generalization from SIOSE to CLC been performed and what degree of uncertainty is conveyed?

With these goals in mind, this paper is structured as follows: first, we begin by providing brief introduction to the CORINE Land Cover and SIOSE databases, showing their features, differences and, in the former case, the recent change in its production methodology. We then describe the study area and the tools with which the analysis has been carried out. Finally, the results are presented and discussed in relation to the problems with the production of CLC in Spain and the rest of Europe.

8.2. SOURCES

8.2.1. CORINE LAND COVER (CLC)

CORINE Land Cover (CLC) is a LULC map developed initially in 1990 (CLC90), with updates for the years 2000 (CLC00), 2006 (CLC06) and 2012 (CLC12). Nowadays, it is updated every six years and comprises most of the European continent, although in each update an increasing number of countries have been taking part in the initiative (Büttner 2014).

CLC is produced following a hierarchical data model or classification system. A set of classes (legend) is defined and organized in a hierarchical manner. Each delimited polygon must be classified as a single class. Consequently, when creating a map, two principles are applied (Valcárcel Sanz and Castaño Fernández 2012): absence of thematic overlap between classes and principle of dominance (the class refers to the main cover in the polygon). However, the difficulty in delimiting heterogeneous areas under a single label leads to the use of mixed classes (e.g. complex cultivation patterns), characterized by inconsistent definitions. These are difficult to handle as they cover a large number of possible mixtures (Valcárcel Sanz and Castaño Fernández 2012). There are no quantitative criteria to follow for their distinction from pure covers, so their definition depends on the criteria established by each CORINE Land Cover production team (Cruickshank and Tomlinson 1996).

CLC is produced at a 1:100,000 scale, with an MMU of 25ha and a Minimum Mapping Width (MMW) of 100 m. Each update generates a change map, in which only changes affecting more than 5ha are included. The first map of this kind (changes 90-00) only drew those changes of more than 5ha which affected previous polygons, while changes which constituted a new polygon had to cover at least 25ha (Büttner 2014).

This change map is the primary product of the CORINE initiative; it is the first map generated after the update. From the intersection with the previous CLC map two maps are generated: a new map for the reference date and a review of the previous map. The European Environment Agency (EEA) emphasizes that the study of the territorial

changes must be made from the change maps and not from the intersection of the CORINE maps for the reference years (European Environment Agency 2015), given that the cross tabulation of various maps can yield technical changes, not real, derived from variations in the production methodology.

CORINE Land Cover is produced at a national level. Each country follows a different production method (photointerpretation, generalization methods), although all are subject to the basic EEA rules. According to the production methodology, the real situation underlying each CLC class can be quite different depending on the country considered.

8.2.1.1. Change of CLC production methodology in Spain: SIOSE generalization

Since 2012 CORINE Land Cover has been obtained in Spain from the generalization of SIOSE (Fig. 8.1). However, as CLC is updated from the intersection of the change layer with the previous revised CLC, the first generalized map was CLC06. This map was subsequently intersected with change map 06-12, generalized from SIOSE, resulting in the new CLC12 (Fig. 8.1).

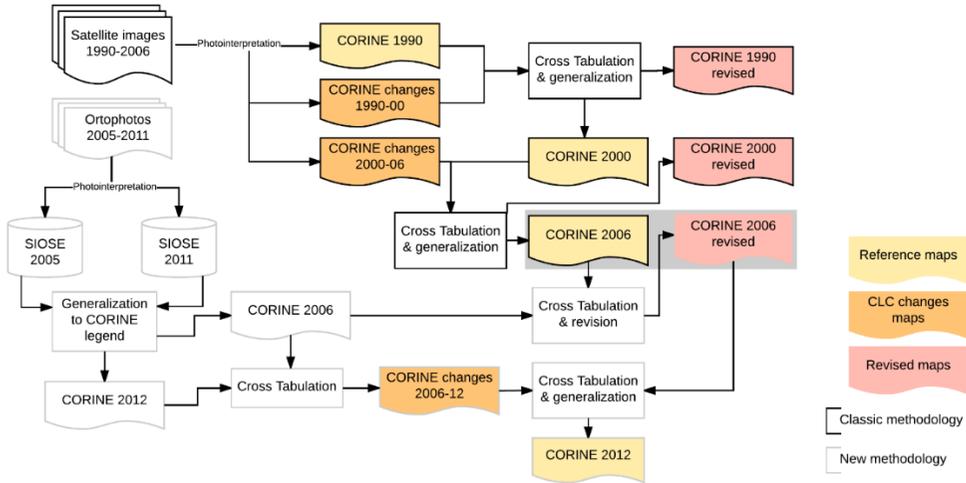


Figure 8.1. CLC Update methodological process according to author’s understanding

In the process of obtaining CLC06, as well as of the change layer 06-12, a SIOSE semi-automatic generalization method was used, consisting of various stages. First of all, translation rules were established between the SIOSE proportions of elements or covers and the CLC classes. Afterwards, a geometrical generalization of the resulting polygons was carried out, with the aim of meeting CLC’s cartographic rules (MMU and MMW). Those polygons not meeting the MMU merged into the neighbouring polygons with closer thematic affinity. Moreover, once the existing corridors (widths not meeting the minimum) were detected, narrowings were corrected through the subdivision and adhesion to neighbouring patches with the greatest thematic similarity.

The translation rules are not public and, making it impossible for researchers to study the translation. Cantarino Martí (2013) has suggested the inexistence of correspondence between certain classes in CLC and SIOSE.

8.2.2. SIOSE

SIOSE is a Spanish database on land cover which was first produced in 2005, with updates in 2009 and 2011 (Equipo Técnico Nacional SIOSE 2015a). Its data model, i.e., the way it stores information on land use and land cover, is its main characteristic. This data model is aimed at objects, and it is also known as a descriptive system. Unlike classification systems (e.g. CORINE Land Cover), each polygon (geometry) is not defined by a single label (class). Instead the list of elements that make up each polygon is broken down, as are the proportions in which they are represented (Fig. 8.2).

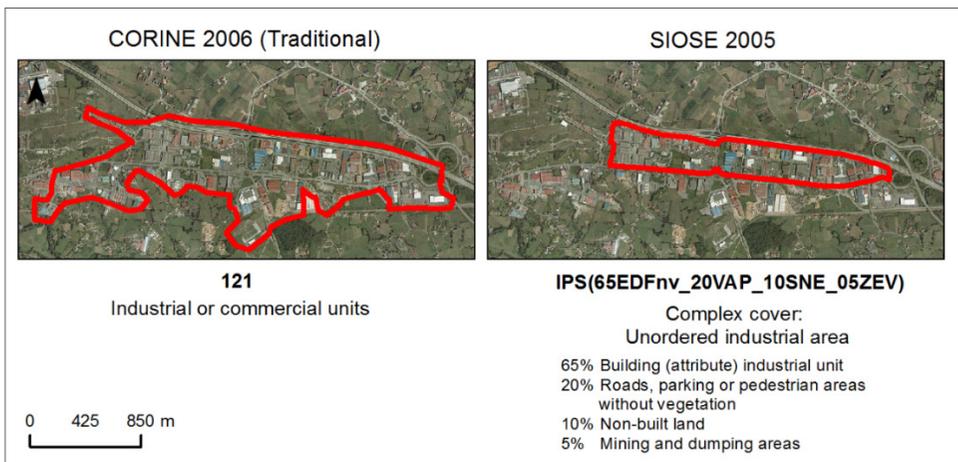


Figure 8.2. Comparison of CORINE Land Cover and SIOSE data models. Sources: CLC 2006 (v.1), SIOSE 2005, Orthophotography PNOA 2006 (IGN)

There is no scale limit for the collection of such data (statistical data). The scale refers to the drawing of polygons (geometric data). These are drawn at a 1:25,000 scale, with a variable MMU (0.5-2ha) in accordance with the cover and a MMW of 15m. When updated, the geometry is only modified when there are changes greater than 0.4ha, while the statistical information does when the change affects at least 20% of the covers that make up each entry (Equipo Técnico Nacional SIOSE 2015b).

SIOSE distinguishes between simple covers, made up of a single element (e.g. shrub), and complex covers, which emerge from the association of several elements. Complex covers can be predefined or non-predefined. Those associations of elements with a particular name (e.g. agricultural residential settlement) are described as predefined complex covers. The other cases are referred to as non-predefined complex covers. Additionally,

some classes can be defined by their attributes (e.g. irrigated arable land; rainfed (unirrigated) arable land).

SIOSE offers very detailed information and it is very flexible in terms of the user's needs: they can generate as many thematic outputs (maps) as desired; the statistical information which makes up every polygon is available to the user, thus they will be able to define it according to the criterion desired (e.g. percentage of forest cover existing in each polygon). However, this implies carrying out a process which makes the use of this database more complex.

Different methods have been followed to extract a LULC map from SIOSE, where each polygon is defined by a single label (Rodríguez Gozalo 2012; Cantarino Martí 2013; Perez-Hoyos et al. 2014; Delgado Hernández 2016). Generally, all of them agree on the creation of a series of translation rules. These define the thresholds from which the proportion of an element or various elements corresponds to a specific class. Following this mechanism, an equivalence between the CORINE Land Cover and SIOSE legends has been achieved. However, Delgado Hernández (2016) warns about the difficulty of adapting a descriptive data model (SIOSE) to a previously defined classification system, i.e., to a class nomenclature which has previously been established, such as CLC.

The production of SIOSE is carried out at a regional level, with the possibility of production differences according to the team in charge of its creation.

8.3. STUDY AREA

The chosen study area is the Asturias Central Area (ACA), as delimited in the Asturias Regional Guidelines for Land Planning (Fig. 8.3)⁴. It comprises the area of greatest demographic and economic development in Asturias (Fernández García et al. 2007), as well as most of the territorial changes in the region.

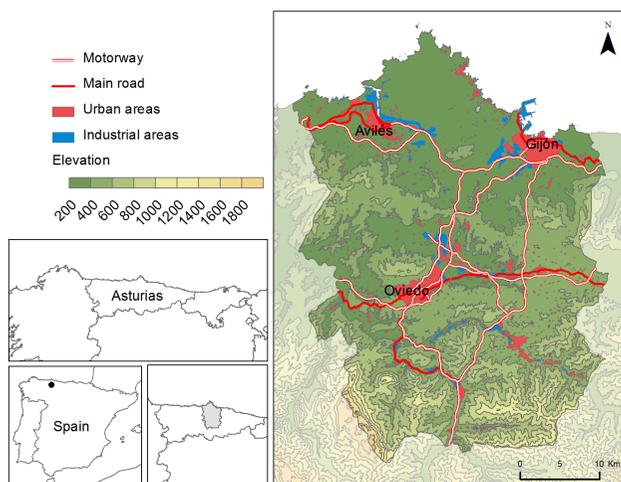


Figure 8.3. Location map of Asturias Central Area. Sources: National Topographic Map 1:200,000; DEM25m; SIANE Spanish National Geographic Institute maps (IGN)

⁴ For detailed information about the study area, refer to Chapter 2.

The Asturian landscape, characterized by overlapping and fragmentation of different uses and covers, is very heterogeneous. The rural land shows an excessive segmentation (Dirección General de Urbanismo 1964) and human occupation of the land is scattered (Gobierno del Principado de Asturias 2006). There is a multinuclear and mixed territorial model in the ACA: urban, industrial and rural. Some of its spaces (Siero-Llanera-Noreña), are characterized by a disorganized mixture of uses (Gobierno del Principado de Asturias 1991). This landscape is therefore of great interest for this study since it varies a great deal according to the scale used.

8.4. METHOD

A cross tabulation of the two CLC maps for 2006, one created using digital photointerpretation (CLC06t) and the other by the generalization of SIOSE (CLC06g) (Fig. 8.4), has been carried out using the matrix designed by Pontius Jr. y Millones (2011), available at <http://www2.clarku.edu/~rpontius/>. This enabled us to find out the quantity and allocation disagreement of the classes⁵.

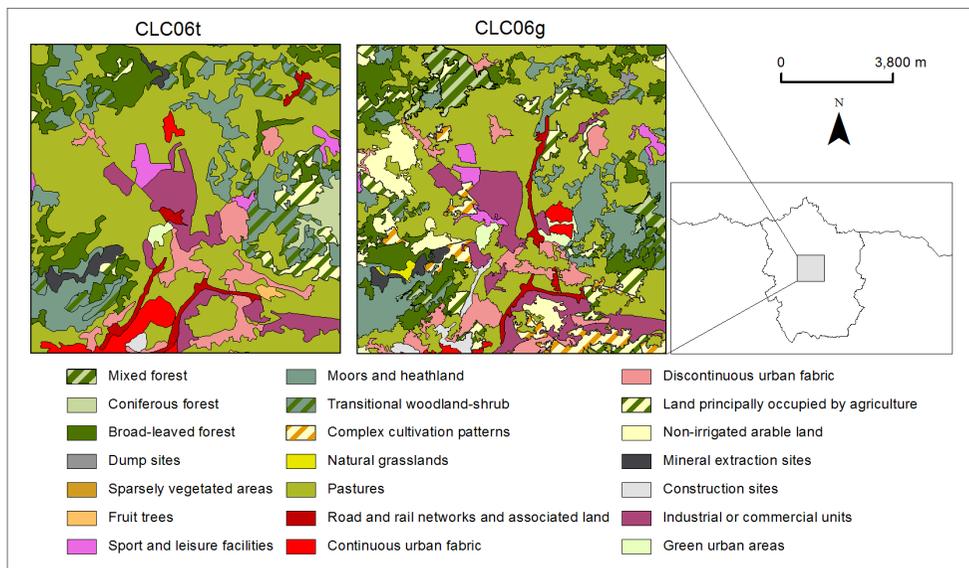


Figure 8.4. Comparison of traditional CLC (CLC06t) and that obtained by generalization (CLC06g) for a sample sector of the study area. Source: CLC 2006 (v.1, v.2) (IGN)

Quantity disagreement refers to the amount of difference between the quantities or proportions of every class in two maps. Overall quantity disagreement (Q) is calculated through the equation (1). Allocation disagreement refers to the amount of difference

⁵ For detailed information about the Pontius Jr's Matrix and the metrics that can be calculated through this tool (quantity and allocation disagreement, and shift and exchange components of the allocation disagreement), refer to Technical Note B.

between pixels of the same class allocated in different positions in two maps. Overall allocation disagreement (A) is calculated using the equation (2).

$$Q = \frac{\sum_{g=1}^J |(\sum_{i=1}^J p_{ig}) - (\sum_{j=1}^J p_{gj})|}{2} \quad (1)$$

$$A = \frac{\sum_{g=1}^J 2 \min[(\sum_{i=1}^J p_{ig}) - p_{gg}, (\sum_{j=1}^J p_{gj}) - p_{gg}]}{2} \quad (2)$$

Where, J represents the number of categories, g is an arbitrary category, i is the index for a category of a row in the contingency matrix, j is the index for a category of a column in the contingency matrix and p_{ig} expresses the estimated proportion of the study area that is category i in the comparison map and category g in the reference map.

Allocation disagreement was split into two components (exchange and shift) according to the method proposed by Pontius and Santacruz (2014). Exchange refers to pairwise confusions whereas shift refers to nonpairwise confusions. Exchange (e) and shift (s) are calculated for an arbitrary category according to equations (3) and (4) and they are explained graphically, together with the quantity disagreement, in the Figure 8.5.

$$e_{tj} = \sum_{i=1}^J (\varepsilon_{tij} + \varepsilon_{tji}) = \frac{2 \times \{[\sum_{i=1}^J \text{MINIMUM}(C_{tij}, C_{tji})] - C_{tjj}\} \times 100\%}{(Y_{t+1} - Y_t) \times \sum_{i=1}^J \sum_{j=1}^J C_{tij}} \quad (3)$$

$$s_{tj} = \frac{\{[\sum_{i=1}^J (C_{tij} + C_{tji})] - 2 \times C_{tjj}\} \times 100\%}{(Y_{t+1} - Y_t) \times \sum_{i=1}^J \sum_{j=1}^J C_{tij}} - \frac{|\sum_{i=1}^J (C_{tij} - C_{tji})| \times 100\%}{(Y_{t+1} - Y_t) \times \sum_{i=1}^J \sum_{j=1}^J C_{tij}} - e_{tj} \quad (4)$$

Where, C_{tij} is the size of spatial extent that is in row i and column j of contingency table for interval t , Y_t is the year at beginning time point of interval t , Y_{t+1} is the year at ending time point of interval t , e_{tj} is the exchange component for category j for interval t and s_{tj} is the shift component for category j for interval t .

The calculation of spatial metrics using the FRAGSTATS software has also enables us to analyze the maps pattern. Those metrics regarded as most significant for the analysis of the area, shape and aggregation of patches were calculated: number of patches, mean patch area weighted and area coefficient of variation (mean area and standard deviation corrected by the size of patches) and mean fractal dimension (complexity of the shape of patches; higher values show more complex shapes). Further explanation and formulation of this metrics can be found in the software help guide (McGarigal et al. 2015) and in the Technical Note B, at the end of this document.

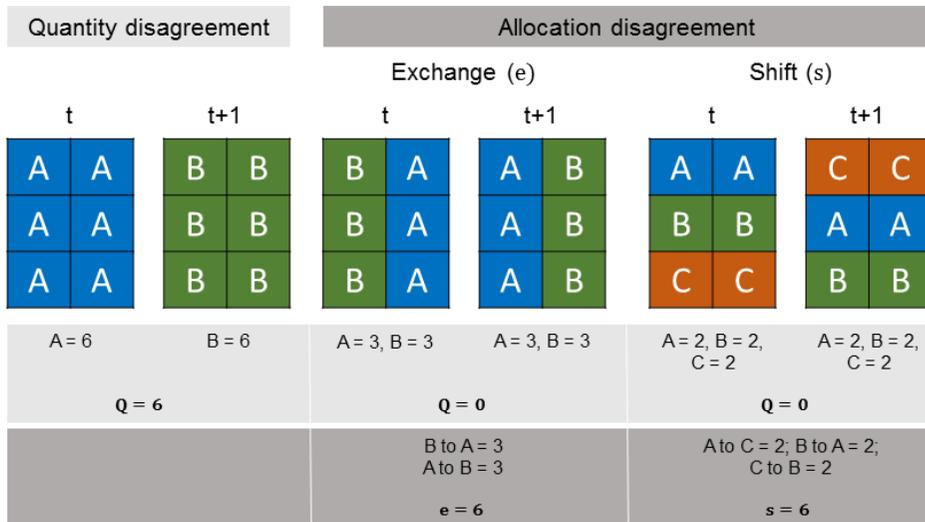


Figure 8.5. Three examples which illustrate the quantity disagreement and two components (exchange and shift) of allocation disagreement. Source: based on Pontius and Santacruz (2014)

Additionally, each CORINE map has been compared to the SIOSE database (Fig. 8.6). Given there is no scale limit in the record of the SIOSE statistical data, we can consider such information as ‘reality’. Hence, their comparison with CORINE maps allows us to assess the composition of each CLC class. This is what Gallego and Bamps (2008) have called “fine scale land cover profile of CLC classes”.

In order to carry out this analysis, the legends for CLC and SIOSE were linked according to the class definitions provided by the respective technical guides. For the most important SIOSE classes, a presence map for each class has been obtained, where each polygon shows the percentage (0 to 100%) in which this cover is present (Fig. 8.6). Nevertheless, the range of possible proportions has been reclassified into four values (0-25%, 25-50%, 50-75% and 75-100%). These maps were intersected with CORINE maps, obtaining a cross tabulation matrix.

In all cases, the maps were rasterized at 25m according to Hengel’s proposal (2006), in the search for the minimum rasterization inference in the analysis at the same time that a manageable volume of data kept. Rasterization inference refers to the uncertainties resulting from the raster to vector conversion, that is, from the change of data model. Several studies have pointed out the influence of the rasterization process in the composition (classes quantities) and configuration (classes pattern) of landscapes (Congalton 1997; Dendoncker et al. 2008; Díaz-Pacheco et al. 2018). The rasterization inference on our analysis proved acceptable in that the maximum deviation detected in the quantities of the classes (composition) was only 7ha. In addition, the variation in the number of patches calculated through FRAGSTATS is negligible. Visual comparison analysis also confirmed that the rasterization inference was acceptable.

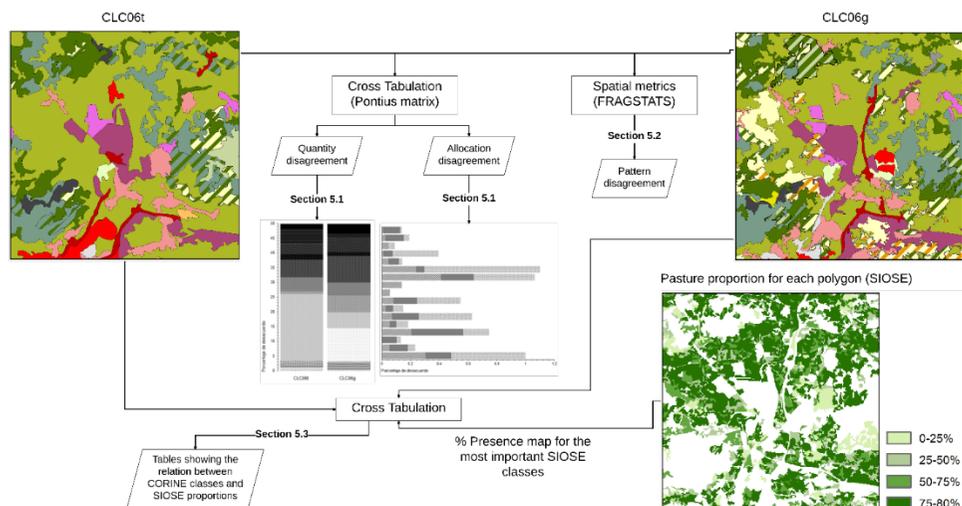


Figure 8.6. Methodological process and results obtained. Sources: CLC 2006 (v.1, v.2); SIOSE 2005 (IGN)

In short, we cross-tabulated the different CORINE maps, and then cross-tabulated each one with the maps of class proportions generated from SIOSE. The first analysis enables us to study the quantity and allocation disagreement at class level for both maps (Section 8.5.1), while the second allowed us to establish a relation between the SIOSE statistical information and the CLC classes (Section 8.5.3). Additionally, the calculation of spatial metrics has facilitated the analysis of the pattern of each map (Section 8.5.2).

8.5. RESULTS

8.5.1. DIFFERENCES IN THE QUANTITY AND ALLOCATION OF CLC CLASSES

Only half of the surface of both CORINE maps for the year 2006 shows the same information (percentage of total difference of 50%) (Fig. 8.7). In the disagreement, 23% corresponds to a quantity disagreement, i.e., certain classes are overrepresented in a map in relation to the other, while others are underrepresented. Within the allocation disagreement, 10% is considered *exchange* (pair wise confusions), while the remaining 17% corresponds to *shift* (non-pair wise confusions).

The quantity disagreements can be observed in the first two bars in Figure 8.7. Each bar alludes to the surface of each class which, for a given pixel, does not correspond to the same class in the other map. When the error bar for a class has a different size in both graphs, there is a quantity disagreement (e.g. the class “Pastures” presents a different proportion in each bar; the difference between both bars – 18% - corresponds to the quantity disagreement for that class). Figure 8.8 shows the allocation disagreement for each class in both maps.

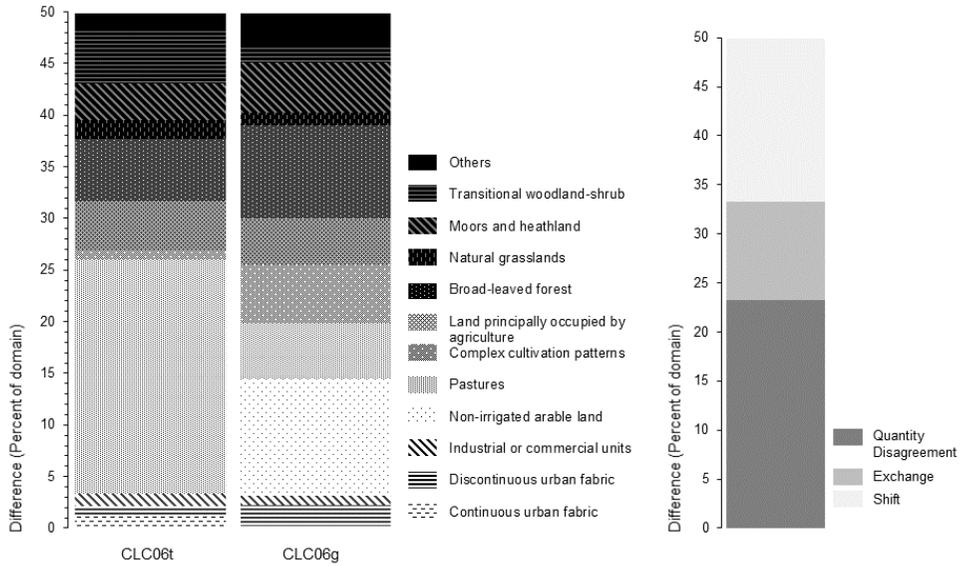


Figure 8.7. Comprehensive comparison of quantity and allocation disagreement between CLC06t and CLC06g

Generally, the agreement is greater for covers developed over very specific and vast areas, of a size greater than the MMU of CLC, and whose definition is clear and precise. This makes it difficult to confuse them with other covers. This is the case for estuaries, water bodies, airports, port areas and, to a lesser extent, beaches, dunes and sands. For these classes the slight disagreement can be due to the degree of precision in the delimitation of their perimeters as a consequence of the photointerpretation scale (1:100,000 in CORINE Land Cover vs 1:25,000 in SIOSE).

Mixed classes (transitional woodland shrub, land principally occupied by agriculture, complex cultivation patterns, sparsely vegetated areas, mixed forest) show the lowest agreement. These are classes which emerge to solve the difficulty of clustering under a single definition the cover amalgam which is found at small scale (cartographic). These mixed labels are often seen as vague and imprecise. Mixed classes in CLC06g are obtained by aggregation of SIOSE data with greater detail. Therefore, their definition falls within the problem defined as the individualistic fallacy. It refers to the falsehood of inferring relations in levels aggregated from existing relations at the individual level (see Chapter 6) (Cao and Siu-Ngan Lam 1997). This means that the results of studies of microlevel relationships cannot be attributed to macrolevel relationships studies: in the case of social sciences, the behavior of one individual cannot be representative of the behavior of the group to which it belongs. Thus, the relations between the landscape elements may differ depending on the scale (Cao and Siu-Ngan Lam 1997; Rindfuss et al. 2004) and, therefore, they may not be the same at SIOSE and CLC scales.

For the rest of classes, part of the differences and agreements may be due to the characteristics of the Asturian landscape. The areas of natural vegetation (e.g. broad-

leaved forest and shrubs) are similar in both CORINE maps. These usually constitute homogeneous, relatively unfragmented areas. In these cases, generalization does not produce big differences between the two maps. On the contrary, the type of Asturian settlement is scattered, in the form of small villages and small clusters of rural houses, with a variable importance of isolated dwellings (Gil Olcina and Gómez Mendoza 2001). Only fine scale maps are able to sketch these small human settlements. As CLC06g is obtained by generalization of SIOSE, it keeps part of these tiny settlements as urban. In CLC06t these disappear due to the visual generalization carried out by the photointerpreter.

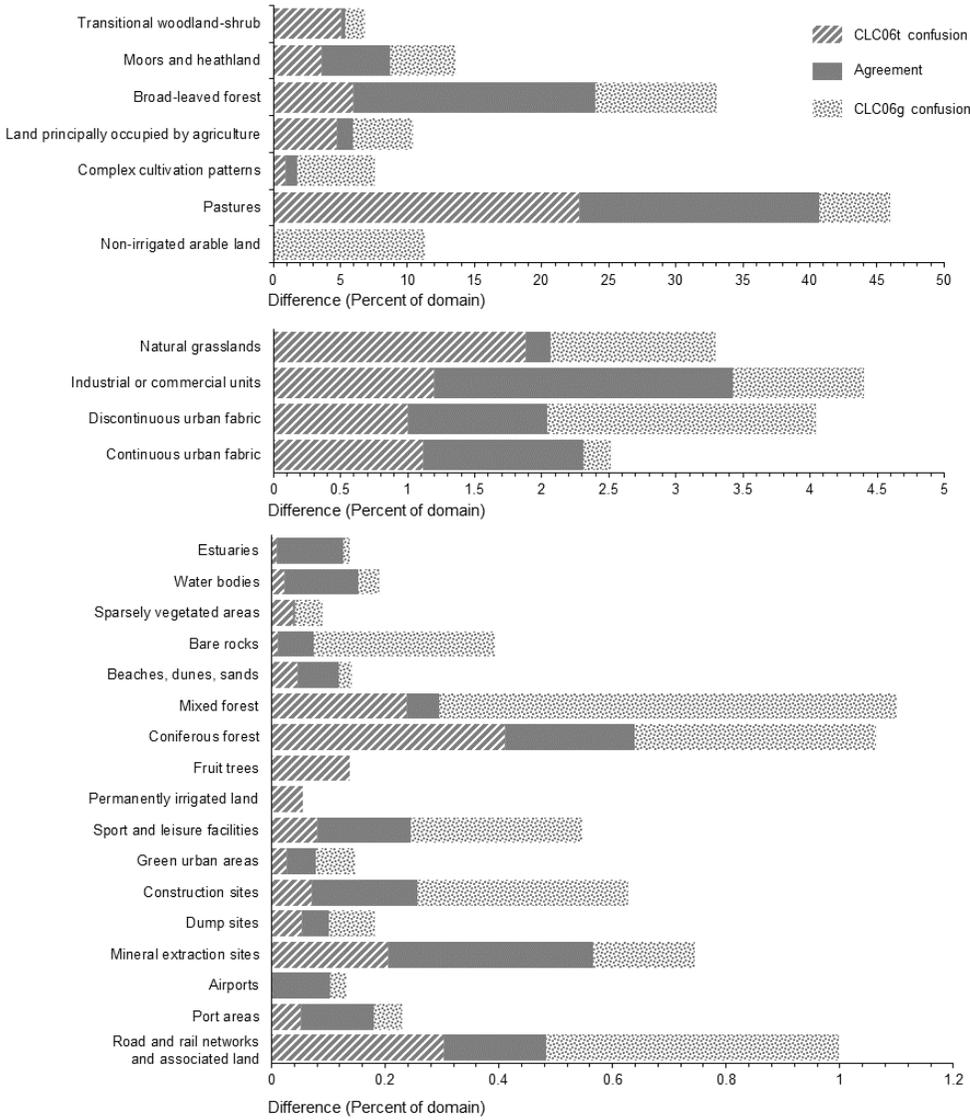


Figure 8.8. Agreement at class level between CLC06t and CLC06g

The heterogeneity and fragmentation of the farming space explains why the farming classes (e.g. pastures, non-irrigated arable land, and complex cultivation patterns) are those with least agreement. Asturian farmland is very discontinuous and fragmented, and tends to develop along the coast and valley floors because of the physical environment limitations (Quirós Linares and Ortega Valcárcel 1987; Cortizo Álvarez et al. 1990). In these areas, traditional farming activities compete with the new urban functions. It is the phenomenon known as peri-urbanization (Cortizo Álvarez et al. 1990) or urban sprawl (Fernández García 2003). Therefore, there is an important amalgam of uses which is inherent in the characteristic fragmentation of the Asturian traditional rural space. Thus, it is difficult to generalize this landscape in large homogeneous units, using only quantitative criteria and without giving the amalgam a visual landscape meaning.

A large part of the farming land in the study area is classified as “non-irrigated arable land” in CLC06g and as “pastures” in CLC06t. It is the latter which best defines the Asturian rural space, due to its trend towards livestock production. In this context, crops, apart from being scarce, are mainly forage crops and, therefore, intended for animal feed (Quirós Linares and Ortega Valcárcel, 1987). Regardless of the landscape, the confusion between pastures and cropland classes is common when working with different LULC maps (Nol et al., 2008; Prestele et al., 2016). This introduces an important uncertainty in our analysis that must be considered.

8.5.2. DIFFERENCES IN THE DISTRIBUTION PATTERN AND SHAPE OF CLC PATCHES

The number of patches, the mean patch area weighted and the coefficient of variation point out the greater fragmentation of the covers in CLC06g. Whereas, the mean fractal dimension shows the greater complexity of their perimeters (Table 8.1). This can be easily verified visually (Fig. 8.9).

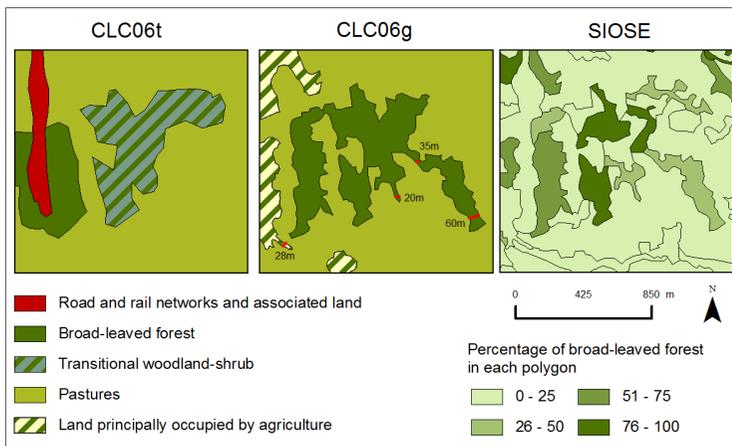


Figure 8.9. Different perimeters and minimum widths in CLC06t, CLC06g and SIOSE. Sources: CLC 2006 (v.1, v.2); SIOSE 2005 (IGN)

Table 8.1. Spatial metrics for those classes with most significant differences

	Number of patches		Mean patch area weighted		Coefficient of variation		Mean fractal dimension	
	CLC06t	CLC06g	CLC06t	CLC06g	CLC06t	CLC06g	CLC06t	CLC06g
Continuous urban fabric	17	15	656.35	318.94	151.12	115.36	1.10	1.14
Discontinuous urban fabric	37	63	286.97	156.45	159.29	110.08	1.13	1.18
Industrial or commercial units	32	38	436.34	410.93	133.59	152.47	1.11	1.14
Road and rail networks and associated land	15	18	62.54	73.64	57.03	54.99	1.14	1.19
Mineral extraction sites	15	15	73.15	62.50	56.98	43.66	1.09	1.15
Dump sites	2	5	87.36	44.76	43.79	43.48	1.11	1.13
Construction sites	8	17	52.78	53.34	35.36	33.41	1.07	1.12
Sport and leisure facilities	9	14	51.61	55.89	52.03	38.10	1.08	1.14
Non-irrigated arable lands	2	95	0.28	2019.99	37.82	325.70	1.20	1.16
Pastures	109	214	22240.4	3512.12	630.09	459.60	1.13	1.17
Complex cultivation patterns	10	107	457.34	1020.61	84.90	319.95	1.12	1.17
Land principally occupied by agriculture	90	153	247.82	90.09	125.03	81.21	1.13	1.16
Broad-leaved forests	252	285	412.73	748.75	140.00	209.39	1.14	1.17
Coniferous forests	9	15	200.86	154.56	96.71	119.44	1.12	1.17
Mixed forests	5	17	99.75	141.99	39.92	95.65	1.15	1.17
Natural grasslands	18	43	550.67	103.33	150.85	107.18	1.12	1.17
Moors and heathland	130	181	390.28	406.48	172.57	200.41	1.13	1.15
Transitional woodland-shrub	130	50	109.29	257.28	90.27	195.26	1.13	1.15

A large number of corridors have been found in CLC06g (Fig. 8.9). These are patches with a width smaller than 100m demanded by CORINE Land Cover and that, hence, infringe its mapping rules. The difficulty in eliminating them in the generalization process explains the important fragmentation of the new CLC, as well as the irregularity in its polygons.

Despite the greater fragmentation of CLC06g, the coefficient of variation is, almost always, greater in CLC06t. In other words, the variability in the patches size is greater in the old CLC, given that the new one has difficulties when generalizing large areas or polygons under a single label.

Therefore, CLC06g shows a different pattern to that which should be expected at a 1:100.000 scale. At this scale, geometry must be much simpler than in maps with greater detail such as SIOSE. The complexity of perimeters, the high fragmentation of covers and the existence of corridors reveals the difficulty of extracting a simpler pattern only from a process of mapping generalization.

8.5.3. COMPARISON OF CLC WITH SIOSE

If we consider the statistical data provided by SIOSE as the “reality”, given these are not limited by any scale, from the intersection with CORINE maps we can find out the “real” composition of the different categories in CLC. Tables 8.2a and 8.2b show the most meaningful results from this comparison. All the results can be found as supplementary material in the Appendix 3, at the end of this document.

CLC06g is more consistent with the SIOSE statistical data than with CLC06t, as might be expected given that the former is produced by generalizing the SIOSE database. The non-mixed classes with simple and clear unambiguous meanings, mainly defined on the basis of one single SIOSE element (e.g. Pastures), show a greater correspondence with that element in CLC06g than in CLC06t. E.g. 70% of the areas identified as Pastures in CLC06g correspond to spaces where at least 75% of the surface are pastures in SIOSE. This is true for just the 45% of the areas labeled as pastures in CLC06t (Table 8.2a).

Mixed classes, a result of the combination of various covers in which no single one is dominant, have a more realistic SIOSE composition in CLC06g. In CLC06t, a large proportion of the area classified as mixed classes is in fact dominated (more than 75%) by a single category. e.g. 33.30% of the area classified as mixed forest in CLC06t correspond to spaces where at least 75% of the surface is covered by broad-leaved trees (Table 8.2b). We made similar findings for woodland shrub. This does not seem logical given that mixed classes are by definition a combination of various covers and large areas of mixed land cover cannot therefore be dominated by a single category.

Despite that better correspondence of SIOSE information with CLC06g, broadly speaking, the intersection of CORINE maps with SIOSE data has not yielded very different conclusions. The differences in proportions are significantly lower than the allo-

cation disagreement between the two maps. For instance, the composition of the discontinuous urban fabric is similar in both CORINE maps (Table 8.2a). However, the allocation agreement is of only 25% (Fig. 8.8). Therefore, 75% of the area identified as discontinuous urban fabric is different in the two maps.

Table 8.2a. Summary of the proportions of SIOSE classes (light grey) present in CLC classes (dark grey) for CLC06t (light orange) and CLC06g (light red). *Example: In the CLC06t 16.91% of the CLC class “Continuous urban fabric” is composed of SIOSE polygons where “Buildings between party walls” represent from 1%-50% of the total area

CLC	Continuous urban fabric		Discontinuous urban fabric	
SIOSE	Buildings between party walls	Buildings between party walls	Detached family house	Semi-detached family house
CLC06t				
1-50%	16.91%*	8.83%	28.41%	5.24%
50-100%	35.72%	5.45%	1.14%	1.81%
CLC06g				
1-50%	15.92%	17.53%	39.28%	4.39%
50-100%	49.30%	8.76%	1.75%	0.65%

CLC	Pastures	Coniferous forest		
SIOSE	Pastures	Broad-leaved trees	Conifers	Shrub
CLC06t				
75-100%	44.94%	6.00%	27.90%	17.67%
CLC06g				
75-100%	70.47%	3.26%	48.10%	1.16%

CLC	Non-irrigated arable lands			
SIOSE	Pastures	Non-irrigated crops	Irrigated crops	Fruit trees
CLC06g				
1-50%	22.62%	66.91%	0.49%	25.02%
50-100%	68.52%	15.76%	0.26%	0.29%

CLC	Land principally occupied by agriculture	Complex cultivation patterns		
SIOSE	Pastures	Pastures	Non-irrigated crops	Fruit trees
CLC06t				
1-50%	20.09%	32.74%	42.51%	46.24%
50-75%	12.92%	17.25%	0.66%	8.06%
75-100%	36.45%	36.68%	1.35%	4.20%
CLC06g				
1-50%	26.33%	32.91%	45.11%	61.75%
50-75%	27.24%	28.25%	1.45%	6.77%
75-100%	25.26%	28.48%	0.75%	2.34%

This difference between the allocation disagreement and the SIOSE proportions which define each CORINE class is attributed to the elements of the landscape which do not belong to the cover (e.g. woodland in the case of discontinuous urban fabric). These are

included in the land cover polygon that resulted from the generalization process. Accordingly, a small forest area within a large area of urban fabric will be labeled as urban fabric to meet the MMU.

Only 50.88% of all the areas identified as discontinuous urban fabric has some proportion of SIOSE elements which make up such category in CLC06t (sum of the percentages shown by the Table 8.2a for that class). This percentage rises to 72.36% in CLC06g. Hence, at best, around 28% of the cover is not made up of the classes which define it in any proportion.

In CLC06t the definition of homogeneous areas that meet the MMU is carried out by visual criteria. For CLC06g, this generalization is based on purely quantitative criteria and on thematic similarity between previously sketched covers. These two ways of production, which are very different, explain those important allocation disagreements even when the elements present under the same covers in both maps are similar to a certain degree. In CLC06t the land covers that take part of a not closely related CLC class result from their visual association with the dominant class that defines the CLC category. On the contrary, in CLC06g these land covers result from their thematic similarity with the CLC category being considered, regardless of the degree of visual association between them.

Table 8.2b. Summary of the proportions of SIOSE classes (light grey) present in CLC classes (dark grey) for CLC06t (light orange) and CLC06g (light red)

CLC	Mixed forest			
SIOSE	Broad-leaved trees	Conifers	Grassland	Shrub
CLC06t				
1-50%	33.53%	39.79%	37.31%	74.85%
50-75%	13.77%	2.31%	0.00%	2.35%
75-100%	33.30%	3.18%	5.77%	5.27%
CLC06g				
1-50%	34.69%	26.45%	19.97%	74.92%
50-75%	54.41%	1.39%	0.54%	17.50%
75-100%	3.40%	0.10%	3.10%	1.42%

CLC	Woodland shrub		Grasslands	
SIOSE	Broad-leaved trees	Shrub	Grassland	Shrub
CLC06t				
1-25%	25.44%	34.13%	17.15%	55.08%
25-50%	10.79%	17.39%	47.71%	10.18%
50-75%	17.17%	9.05%	11.74%	9.78%
75-100%	20.63%	19.31%	10.88%	12.42%
CLC06g				
1-25%	54.30%	32.55%	11.64%	27.20%
25-50%	17.53%	13.00%	5.07%	21.44%
50-75%	12.36%	24.37%	20.53%	4.55%
75-100%	3.44%	17.44%	47.27%	6.50%

The CLC-SIOSE intersection is of special interest for the study of mixed classes. Through SIOSE data it is possible to know which “real” covers make up these categories of inconsistent definitions.

In land principally occupied by agriculture, in both maps the classification as farmland is determined by the presence of pastures (Table 8.2a) and, to a lesser extent, by non-irrigated crops and fruit trees, which obtained similar proportions on both maps (see Appendix 3). The livestock-oriented agricultural landscape of Asturias produces distributions of this kind. The complex cultivation patterns correspond to an association of crops and pastures (mainly pastures). Similar patterns were also observed in the CLC for Ireland (Cruickshank and Tomlinson 1996). However, CLC06g uses this class to a greater degree than CLC06t (Fig. 8.8), in spite of its limited usefulness due to its vague definition.

Non-irrigated arable land is the type of cover with the greatest disagreement between the two CORINE maps: residual in CLC06t (0.5ha, the remains of a polygon which allocates mostly outside the study area), it defines large areas of the Asturian countryside in CLC06g (16,532ha). According to SIOSE data, in CLC06g these areas emerge from the combination of crops and pastures, with the main presence of the latter (Table 8.2a). Such mixture seems to correspond to the characteristic Asturian farming landscape referred to above. The category “Pastures” seems to define this situation better, as can be seen in CLC06t.

8.6. DISCUSSION

8.6.1. UNCERTAINTIES LINKED TO GENERALIZATION METHODOLOGIES

The polygons delimited by the new CLC (CLC06g) present more complex and detailed perimeters than those of earlier CORINE maps obtained by photointerpretation (CLC06t). These are the perimeters sketched at the SIOSE photointerpretation scale (1:25,000) which therefore do not correspond to the lower degree of complexity expected at a 1:100,000 scale. A possible solution to this problem would be to implement geometrical simplification mechanisms, as in other countries (Brown et al. 2002; Härmä et al. 2004; Solbjørg et al. 2010), or to adapt the resulting geometry to the perimeters of the previous patches (Gil et al. 2010; Lydon and Smith 2014).

The minimum width rule (100m) has been omitted many times. The absence of a method to detect these narrowings automatically is one of the problems of obtaining maps by generalization (Gil et al. 2010). Methodological improvements in this direction are therefore required.

The fulfillment of those mapping rules (MMU and MMW) has been achieved by annexing smaller polygons (less than 25ha and 100m) to the neighbouring polygons with greater thematic similarity. Although technically it seems the best solution, it has important conceptual inconsistencies.

Homogeneous areas can only be delimited through a visual photointerpretation process. These areas present similar patterns and textures, and their elements have a certain spatial relation, impossible to determine through quantitative methods (Büttner 2014). This is what Feranec (1999) defined as element association, and for whose definition an experimented interpreter is required, who knows the study area. This person, whose work determines the quality of the maps created (Strand et al. 2002), has no role in the generalization process. Consequently, important inconsistencies are generated in the resulting map (Fig. 8.10).

The covers observable at a finer scale are not the result of a simple aggregation of homogeneous covers at coarser scales (*individualistic fallacy*, as defined in the results). On the contrary, they result from the delimitation of new simpler and heterogeneous covers, consequence of the combination of landscape elements at the given scale. Hence the connection of each scale to a specific legend.

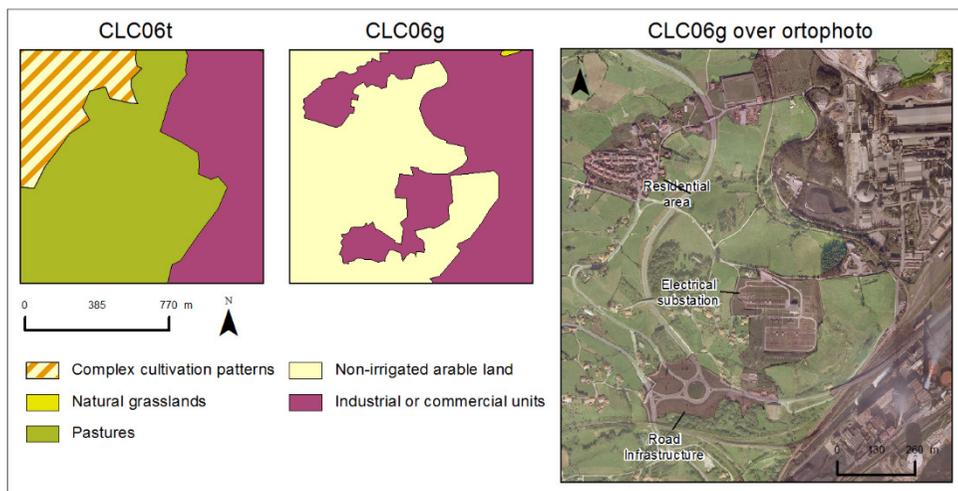


Figure 8.10. Consequences of the process of aggregation of neighbouring polygons according to their thematic similarity. Sources: CLC 2006 (v.1, v.2); Ortho photo PNOA 2006 (IGN)

The landscape heterogeneity determines the quality of the generalization. Areas of homogeneous and clearly differentiated covers change to a lesser extent with scale than those spaces characterized by the mixture and fragmentation of their covers (Ozdogan and Woodcock 2006; Waser and Schwarz 2006; Pérez-Hoyos and García-Haro 2009; Verburg et al. 2011). The diversity of the Asturian landscape makes generalization difficult. Similar problems have been identified for other spaces in the north of the Iberian Peninsula, with similar territorial characteristics (Perez-Hoyos et al. 2014; García Martínez et al. 2015), as well as, in general, for the Mediterranean landscapes (Pérez-Hoyos et al. 2012) and mountainous areas (García-Llamas et al. 2016). It would be interesting to repeat this study for more uniform landscapes, such as the Castilian plain. This would enabled us to discover the total uncertainties in the new Spanish CLC.

8.6.2. CLC LIMITATIONS

In Spain, as in Ireland and Germany (Hovenbitzer et al. 2014; Lydon and Smith 2014), obtaining CORINE Land Cover through generalization has generated a new map which, directly, is not directly comparable with the previous ones. Therefore, the consistency of the time series has been lost.

The EEA (*European Environmental Agency*) states that the variations in land cover must be studied from the corresponding change maps (European Environment Agency 2015), where the technical changes have been deleted. However, such limitations are incompatible with the real uses of CORINE maps. In LUCC modelling, it is essential to work with LULC maps for different dates. They are used for extracting the rates and pattern of change, as well as for determining the drivers of change (Soares-Filho et al. 2002; Mas et al. 2011). Likewise, most studies that aim to analyze territorial dynamics, use techniques which demand the use of reference maps (Feranec et al. 2000, 2010; Hewitt and Escobar 2011). In other cases, CORINE reference maps are used to generate derived products, which will be updated on the basis of the new maps (Goerlich and Cantarino 2013). Therefore, the limitations of the database imposed by the EEA do not respond to the practical utility which the academic and professional communities demand from these maps. New tools must be found which allow us to compare LULC maps for different dates, even if they have been produced using different methodologies.

Obtaining CORINE Land Cover from the generalization of more detailed mapping system provides more consistency between databases for the same country and a considerable economic saving. However, the generalization method and the national source map do not have the same characteristics in every country. Therefore, it should be assumed that the situation displayed under the same CLC class may be very different depending on the country considered. However, this can also happen in the traditional methodology due to the subjectivity of the photointerpreter. Also because the CORINE Land Cover legend does not fill well the geography of the country taken into account (Smith et al. 2007). In any case, the automatic methods to obtain LULC maps, whether by generalization or supervised classifications, have always been considered less efficient than traditional photointerpretation (Feranec et al. 2007).

It is necessary to study “real” covers which are included under each CLC class at the country level, in a similar way as it has been done in Norway (Aune-lundberg and Strand 2010). Only then can the limitations and uncertainties linked to this database be known.

We also require greater transparency in the methods used to obtain CORINE Land Cover from generalization techniques. Only through the detailed knowledge of such methods can we discover the limitations of the maps. The error reports carried out by Ireland during the CLC production methodological change may be used as reference (Lydon and Smith 2014). In the case of Spain, the knowledge of the rules applied to translate SIOSE classes into CLC categories is a basic essential step to understand the uncertainty linked to the new maps thus generated.

8.7. CONCLUSIONS

The change of methodology in the production of CLC in Spain has generated a new map that is different from the previous ones. Obtaining it from the generalization of SIOSE has improved the consistency between the different LULC maps for Spain and savings have been achieved in the production costs. However, the new CLC presents important uncertainty sources.

Obtaining it from a process of quantitative generalization cannot be compared with the task traditionally carried out by photointerpreters. Although the new map provides more detail, homogeneous areas are now deleted on the basis of statistical rather than visual criteria. As a result, both the perimeters and the fragmentation of the patches do not correspond to the degree of detail expected at a 1:100.000 scale. Thus, even when obtaining CORINE Land Cover from other sources at finer scales, expert intervention seems crucial to produce a good quality map. Additional stages in the CORINE Land Cover production method based in expert criteria should be added in order to avoid inconsistencies like those reported.

In addition, due to the importance of CORINE Land Cover for the academic community, a detailed technical study is necessary on the consequences of the change of methodology of CLC in Spain. Changes in production methods should bear in mind the real use of this database and the demands of the different sectors in society. In this regard, the consistence of the temporal series of CORINE maps is perhaps the most widely appreciated characteristic of this database. This means that all possible efforts must be made to ensure its temporal coherence.

An analysis of the meaning of the different CLC classes is also required so as to improve our knowledge of this dataset. Only through these reports can we uncover the uncertainties that CLC conveys regarding the different mapping criteria used in each European country. This means that even if we cannot change the current inconsistencies, we should at least be aware of them so as not to use the CORINE maps incorrectly.

In conclusion, we consider that the European Environmental Agency should organize a debate open to all CLC users to establish a common framework for the production of CORINE Land Cover, so as to avoid the big disparities between the data provided by the different countries.

IV

**Análisis de la incertidumbre
en la Modelización del Cambio
de Usos y Coberturas del Suelo**

Chapter 9

The influence of the spatial scale in LULC modelling. A comparison between two different LULC maps (SIOSE and CLC) ¹

9.1. INTRODUCTION

Scale has been described as a priority topic of research in relation to spatial information analysis and representation (Turner et al. 1989, Quattrochi and Goodchild 1997b, Castilla et al. 2009) and in modelling issues (Ménard and Marceau 2005, Lesschen et al. 2005, Houet et al. 2010, Van Delden et al. 2011, National Research Council 2014). Goodchild (2001) even went so far as to say that "scale is perhaps the most important topic of geographical information science", and to view scale as a science in itself (Quattrochi and Goodchild 1997a, Wu and Qi 2000, Quattrochi et al. 2001).

Scale can be understood in a wide variety of ways (Lam and Quattrochi 1992, Wu 2004, Ménard and Marceau 2005), such as cartographic scale (ratio), observational scale (map size or study area size) or operational scale (scale at which certain processes operate in the environment)². When we talk about scale we may also be referring to the level of detail represented in a map (Agarwal et al. 2002, Verburg et al. 2004). There is also the relation between scale and spatial, temporal and thematic resolution. Some researchers refer to this as spatial scale (spatial resolution) or temporal scale (temporal resolution) (O'Sullivan and Perry 2013).

When assessing the relation between scale and spatial resolution, a key concept is the Minimum Mapping Unit (MMU), i.e. the minimum area of the smallest unit in a map. This will be smaller at fine scales and bigger at coarse scales. Castilla et al. (2009) considered the MMU to be an important parameter, which should be included in the concept of scale together with thematic resolution, while Saura (2002) stressed its importance in the variance of spatial data representation.

¹ This chapter has been published as book chapter in the book *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*.

García-Álvarez D (2018) The influence of scale in LULC modelling. A comparison between two different LULC maps (SIOSE and CORINE). In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 187–213. doi: 10.1007/978-3-319-60801-3_10

² Refer to Chapter 6 for a detailed definition and characterization of the scale in geospatial analysis and Land Use Cover Change Modelling (LUCCM).

The main objective of this chapter is to analyse how the scale of the selected Land Use Land Cover (LULC) maps³ can affect modelling. This involves analysing how scale can cause maps to show different information and studying the ways in which model behaviour varies depending on the data detail (MMU). In order to achieve these objectives, we compared two LULC maps (SIOSE and CLC) with different cartographic scales (1:25.000 vs 1:100.000) and different MMU (0.2-2ha vs 25ha).

The chapter is divided into five main sections. After an initial introduction, the second section describes the study area and data sets. Section 9.3 explains how we adjusted the LULC maps to obtain two comparable sources and then goes on to describe the model we used and how it was calibrated. It also has a short introduction to the methods we used in the analysis and assessment of data. In section 9.4 we present the results and in section 9.5 we discuss the main findings of the research.

9.2. TEST AREA AND DATA SETS

9.2.1. TEST AREA

Our chosen study area was the Asturias Central Area⁴, which as its name suggests, is in the centre of the Asturias region, in northern Spain (Fig. 9.1). Although from a geographical point of view it is not a coherent homogeneous space that is clearly differentiated from its surroundings, there is a functional link between its different component parts (Fernández García et al. 2007, Carrero de Roa 2012) and as a result it has been declared a special planning area within the Asturias Territorial Plan (*Directrices Regionales de Ordenación del Territorio*).

Most of the Land Use Land Cover (LULC) changes taking place in Asturias are represented in this Central Area. These changes are essentially rural-urban and rural-industrial, and take place in the main centres of economic activity. Within the study area there are several sub-areas with a specific economic profile (Rodríguez Gutiérrez et al. 2009), which are therefore affected by specific LULC dynamics. For the whole study area, transport infrastructures, and above all roads, are the main drivers of change.

9.2.2. DATA SETS

We selected CLC and SIOSE as our two data sets (Fig. 9.2). CORINE Land Cover (CLC) is a well-known LULC resource that has often been used in modelling studies (Verburg and Overmars 2009, Camacho Olmedo et al. 2013, Renwick et al. 2013). It is updated every six years and covers most EU countries.

³ As stated in the Chapter 3, the word “map” is used here as synonym of spatial dataset. However, in a strict sense, the term “map” just describes the composition obtained after processing, managing and editing geographical information data.

⁴ For detailed information about the study area, refer to Chapter 2.

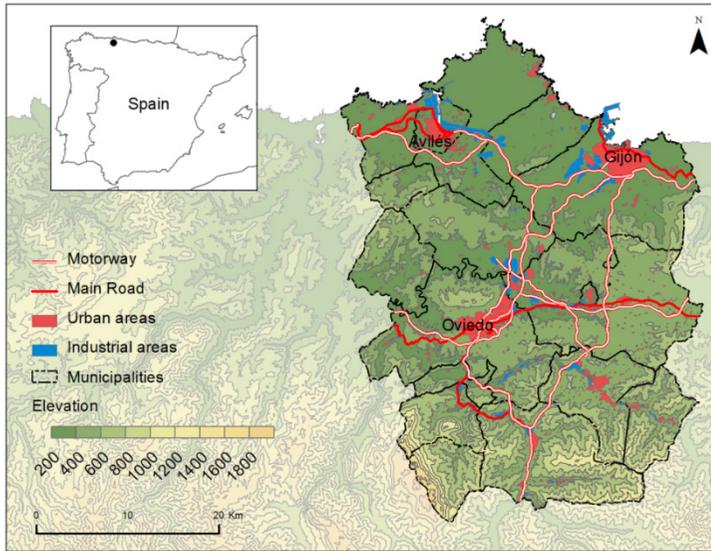


Figure 9.1. Map showing the location of the Asturias Central Area (2015). Sources: National Topographic Map 1:200,000, DEM 25m (IGN)

This standardized approach allows users to make comparison studies across the EU. Nevertheless, some authors have noted that each member state has its own CLC team applying slightly different criteria, each of which has produced a CORINE map with a different validity rate (Waser and Schwarz 2006).

The CLC scale of reference is 1:100,000. It has a minimum mapping unit (MMU) of 25 hectares and a minimum polygon width (MPW) (minimum distance between two polygon sides) of 100 meters. As a general rule, only changes affecting areas of over 5ha are drawn. The final product is a map made by photointerpretation in which each polygon is assigned to a single category (*classification system*) (Hernández 2016).

CORINE Land Cover is very useful for studies at regional and national levels. However, when studying urban land covers with complex patterns and a heterogeneous nature, this scale may be insufficient (Antrop 2004, Herold et al. 2005). This is also true for studies which require more detailed analysis (Chas-amil and Touza 2015), especially those focusing on local or sub-regional areas.

SIOSE (*Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España* - Information System about Land Cover in Spain) is an LULC map made at a scale of 1:25.000. This allows for more detail, with a MMU of between 0.5 and 2 hectares depending on the particular land cover (e.g. 0.5ha for wetlands, 1ha for urban areas and 2ha for forests). The MPW in SIOSE is 15m. Nevertheless, in certain cases SIOSE accepts even lower widths and areas below the specified minimum. This is very important because it makes a big difference in the spatial representation of the terrain, allowing infrastructures such as roads to be represented on the map. These infrastructures create barriers that produce additional divisions of the covers that cannot be seen on maps at smaller scales. When updating SIOSE maps, small changes affecting areas of less than 0.4ha are not included.

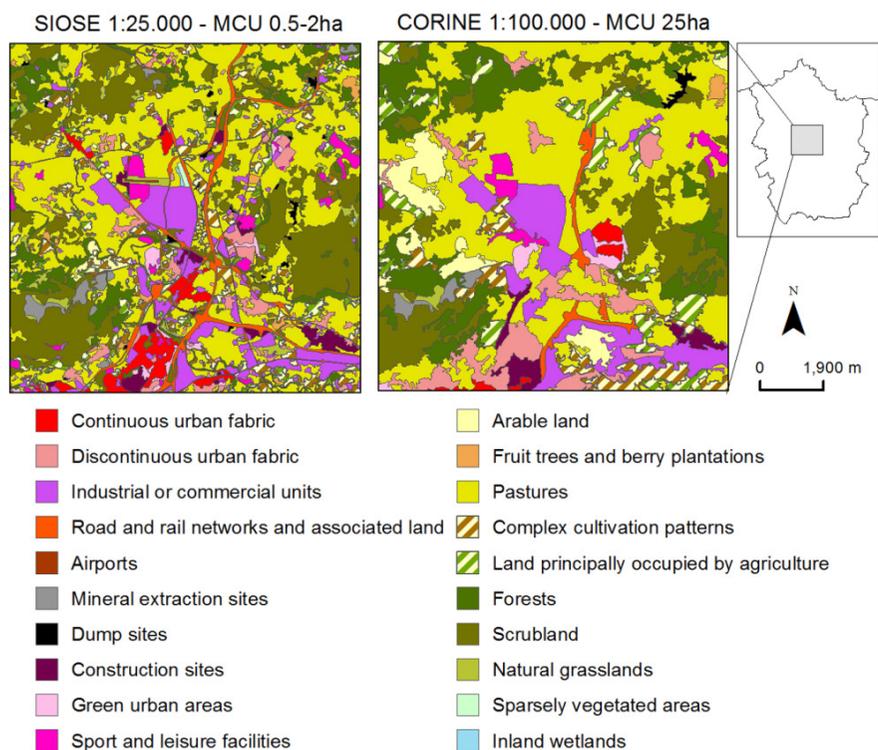


Figure 9.2. LULC for an example area (Lugones-Llanera) as represented by SIOSE (left) and CORINE Land Cover (right). This area is one of the most dynamic spaces in the study area. Sources: SIOSE 2005, CLC 2006 (IGN)

The SIOSE data set has two different parts. Firstly, a polygon map which marks out homogeneous areas with similar characteristics (either single categories or mosaics of various different categories) and secondly, a database which compiles all the land cover information for each polygon without scale restrictions, i.e. each polygon has a log in the database where the different land covers that make up the polygon and their proportions are registered. This database model is called Application Schema (ISO 19101) (ISO/IEC 2014) and this way of gathering information is known as a description system (Hernández 2016).

One of the main advantages of the SIOSE database model is the enormous detail it provides about the earth's surface. Nevertheless, this wealth of detailed information must be generalized in order to produce a map in which each polygon is allocated to a single class or category, i.e. to move from a *description system* to a *classification system*. The resulting map will vary according to the thresholds we use in the generalization process. This introduces uncertainty in the analysis that must be addressed in further research.

Since 2012 the Spanish CLC has been obtained from a generalization of SIOSE⁵. The new CORINE Land Cover production method has caused important changes in the CLC

⁵ For a detailed description of this change of methodology and the consequences, see Chapter 8.

map, which has many striking differences from the previous version (2006). Every time CORINE Land Cover is updated, the previous map is reviewed. Hence with the updating of CLC in 2012, the National Geographic Institute of Spain produced a new version of CLC 2006 that is coherent with CLC 2012, so enabling comparisons to be made. However, as SIOSE only started in 2005, this retroactive adjustment of CORINE Land Cover cannot be performed for earlier versions, making it impossible to analyse change over longer periods (from 1990 to 2012).

Both data sets are vector data, which must be rasterized to be used as input in the chosen Land Use Cover Change (LUCC) model (Dinamica EGO). Vector data allows for more precise feature allocation, but modelling is more difficult in this structure because each spatial entity has a different shape and form; e.g. computing neighbourhood interactions is much more complex than with rasters, characterized by a simple, regular shape (Burrough et al. 2015).

In our case study, we have selected the two dates for which both maps were available: 2005-2006 and 2011-2012. As CLC has been generalized from SIOSE for both these dates, the baseline information is the same for both maps. This enables us to compare the two maps and analyse the changes in the land uses and covers over this period.

Summarizing, the uncertainty arising from the use of diverse data sets is dependent on the following variables: cartographic scale, minimum mapping unit and generalization process.

9.3. METHODOLOGY

We began by adjusting the two data sets (SIOSE and CLC) to produce two comparable LULC maps with the same legend (see Figure 9.3). These maps were then compared to identify any differences between them. Once we had obtained the model inputs, one modelling exercise was set up for each input map using criteria based on expert knowledge. Finally, both model exercises were run to obtain a simulation for the year 2020. Differences between the two simulations were analysed and compared with real changes over the calibration period (2005-2011).

9.3.1. DATA SET PROCESSING

SIOSE and CLC were adjusted to make them comparable (same legend). The legend we chose is a slight modification of the Level 3 CLC legend, which we simplified in order to focus on the most important types of cover in the study area.

As SIOSE was designed to serve as a basis for the production of CORINE Land Cover by generalization, there are no significant problems in the equivalence between the two legends; each SIOSE category fits well with the meaning of broader categories in CLC. The associations between the categories on the two maps were made in accordance with similar category meanings. The definitions of the categories were obtained from the technical guides of both datasets.

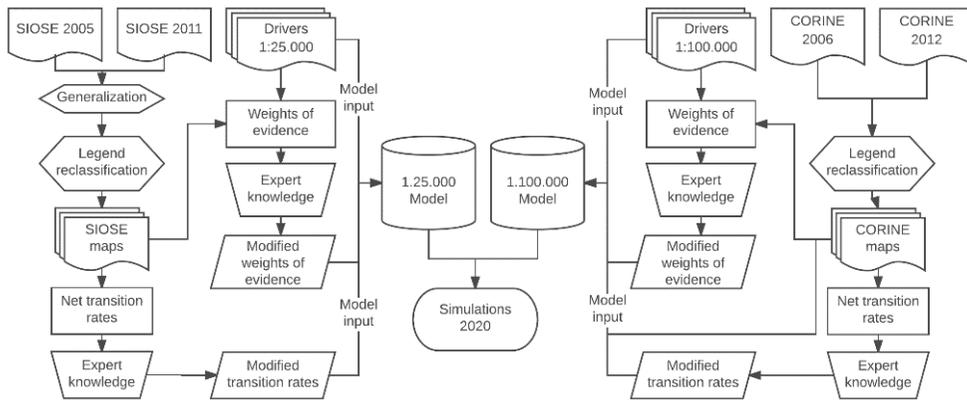


Figure 9.3. Flowchart of the methodological procedure we followed to produce two modelling exercises, one for each input map (SIOSE and CORINE Land Cover)

The most crucial step in the processing of the data sets was the generation of a SIOSE map from the numerical information provided in the SIOSE database, that is, the respective proportions of each of the categories that make up each polygon. We have established a set of rules which, for each land cover, establish the thresholds above which a specific proportion of land cover or an association of several land covers with different proportions can be given an individual label (e.g. when three quarters of a polygon is occupied by a particular LULC category, the entire polygon will be allocated to this category).

The final step in the data set treatment was the rasterization of the maps, given that modelling software requires raster data. We chose the resolution following the method established by Hengl (2006). Bearing in mind the cartographic scales of the reference maps (1:25.000 and 1:100.000) we opted for a resolution of 12.5m for SIOSE and 50m for CLC.

All this data set processing inevitably introduces uncertainty into the analysis. Even the choice of legend can affect the results of the model (Dietzel and Clarke 2006, Conway 2009). However, this question would be best addressed in additional future research. We have tried to maintain the maximum thematic detail by avoiding introducing external factors (such as thematic resolution) into the analysis.

The vector to raster conversion has also introduced new uncertainty. Comparison of the final raster maps with the vector data has shown a maximum difference per category of 7.6ha for SIOSE and 22ha for CLC, with a mean difference of 3.9ha and 1.3ha respectively. This uncertainty is minimal, although some studies have also noted the important influence of rasterization in the analysed pattern (Dendoncker et al. 2008). Finally, the way we processed the SIOSE maps (generalization) also introduced additional uncertainties.

It is therefore necessary to compare the two input maps in order to distinguish their initial differences from the simulations, differences caused by the fact that the model

behaves differently depending on the specific data set being modelled. This analysis was carried out for maps for 2011-12 according to methods explained at the end of this section (Data analysis and assessment).

9.3.2. MODELLING

9.3.2.1. Modelling framework

We used the Dinamica EGO software⁶, which has been widely tried and tested in recent modelling research (Maeda et al. 2011, Ahmed and Bramley 2015). Furthermore, several model comparison studies praised Dinamica EGO's architecture and flexibility (Mas et al. 2011, Pérez-Vega et al. 2012, Mas et al. 2014).

It is a stochastic cellular automata model that simulates transitions through two different functions: expander and patcher. The expander function models new pixels as an expansion of previous patches, whereas the patcher function models one or several new pixels as a new patch for the category. In addition, the model uses the Weights of Evidence method to produce a probability map of occurrence for each transition. More information about the components of the model and its characteristics can be found in Soares et al. (2002) and in the Technical Note A. It is compared with other models in Follador et al. (2008) and in the Chapter 11 of this investigation.

9.3.2.2. Model calibration and simulation

We set up two modelling exercises (Fig. 9.3), one for each of the LULC maps we compared (SIOSE and CLC). These maps were calibrated against real data for the period 2005-06 – 2011-12, the only available dates. The model then ran a simulation up to the year 2020, which fits well with the short calibration period (six years).

The land covers modelled were the most dynamic artificial (soil-sealing) covers in the study area. We selected the most significant transitions (i.e. those affecting the largest areas of land) during the calibration period (2005-06 – 2011-2012) (Table 9.1). Usually, a threshold of 10ha was applied. Different transitions were selected for each exercise because of the different input maps (SIOSE and CLC). These measure a different amount of change between categories.

Transition rates were computed by Dinamica EGO using a Markov matrix, which was obtained by comparing LULC maps for the selected dates (2005-06 – 2011-12). Since each pair of LULC maps measure a different amount of change, the transition rates are also dissimilar (Table 9.1).

For each transition, we chose a set of driving forces according to information collected in interviews with experts in this field together with information provided by academic studies about the study area (Fernández García et al. 2007, Rodríguez Gutiérrez et

⁶ For a detailed description of Dinamica EGO, refer to Technical Note A.

Table 9.1. List of transitions for the two models, showing the categories involved in each transition and in the corresponding transition rates. The Percent of original rate column refers to the selected proportion of the original transition rates. These were obtained by cross tabulation of calibration dates

SIOSE				CORINE Land Cover			
Modeled cover	Transition from	% of original rate	Transition rate	Transition rate	% of original rate	Transition from	Modeled cover
Continuous urban fabric	Construction sites	50	0.015410	0.002338	50	Construction sites	Continuous urban fabric
	Pastures	33	0.000119	0.000021	33	Pastures	
Discontinuous urban fabric	Construction sites	100	0.016205	0.033069	100	Construction sites	Discontinuous urban fabric
	Pastures	33	0.000060	0.000183	33	Pastures	
Industrial or commercial units	Construction sites	33	0.014230	0.007034	33	Construction sites	Industrial or commercial units
				0.000037	25	Arable lands	
	Pastures	25	0.000042	0.000087	25	Pastures	
	Complex cultivation patterns	25	0.000038				
				0.000198	25	Land principally occupied by agriculture	
	Forests	25	0.000019	0.000009	25	Forests	
				0.000150	25	Natural grasslands	
Road and rail networks and associated land	Construction sites	150	0.011951	0.009200	150	Construction sites	Road and rail networks and associated land
Mineral extraction sites	Forests	33	0.000099	0.000094	33	Arable lands	Mineral extraction sites
	Shrubland	33	0.000103				
Dump sites	Pastures	33	0.000059	0.000036	33	Forests	Dump sites
	Forests	33	0.000104				
Construction sites	Dump sites	15	0.001848	0.000193	15	Pastures	Construction sites
	Arable lands	15	0.000213				
	Pastures	15	0.000186				
	Complex cultivation patterns	15	0.000113				
	Land principally occupied by agriculture	15	0.000123				
	Forests	15	0.000054				
	Natural grasslands	15	0.000070				
Scrubland	15	0.000077	0.000045	15	Scrubland		

al. 2009, Alonso Ibáñez and Pérez Fernández 2012). The selection of explanatory variables was based on expert knowledge, methodological orientation (Pontius Jr. et al. 2008) and the availability of data. Although the drivers were the same for both models, when the source offered the same data at different scales we created separate variables according to the input data scale (Table 9.2). Therefore, there are slight differences between the two modelling exercises because of the different scale used in these separate variables.

Table 9.2. List of drivers used in the two models

Drivers	Source		Year
	SIOSE	CLC	
Euclidean distance to regional roads	NTN 1:25,000	NTM 1:100,000	2011
Euclidean distance to highways	NTM 1:25,000	NTM 1:100,000	2011
Euclidean distance to train stations	NTM 1:25,000	NTM 1:100,000	2011
Euclidean distance to residential buildings	NTM 1:25,000	NTM 1:100,000	2011
Euclidean distance to industrial buildings	NTM 1:25,000	NTM 1:100,000	2011
Euclidean distance to coastline	NTM 1:25,000	NTM 1:25,000	2015
Euclidean distance to leisure facilities	SIOSE	CLC	2011
Population density	Basic geographical name index of Spain		2011
Slopes	DEM 5m	DEM 25m	2015
Future road development	NTM 1:100,000	NTM 1:100,000	2015
Rural settlements limits	Asturias planning maps		2015
Urban settlements limits	Asturias planning maps		2015
Building land	Asturias planning maps		2015
Protected areas	Asturias planning maps		2015
Mining area restructuring plans	Asturias planning maps		2015
Substratum	Geology Map 1:50,000		2015
Industrial ports	NTM 1:100,000		2011

*NTM: National Topographic Map; DEM: Digital Elevation Model.

The modelling exercises were calibrated through the *Weights of Evidence* method according to the knowledge provided by the experts we interviewed and information from previous research. When strange or incorrect behaviour was detected, we corrected it manually. Variables with a correlation (Cramer's Coefficient) greater than 0.5 were discarded according to thresholds established by similar studies (Quiroz Ortuño 2009; Maeda et al. 2011). The flexibility of the Dinamica EGO modelling framework, which allows the user to manually modify the calculated Weights of Evidence, enabled us to adjust the model parameters in order to obtain the maximum similarity between the two simulations. Thus, both exercises were run with the same Weights of Evidence, according to the expert criteria.

The patcher and expander function parameters (proportion of changes simulated as expansion, patch isometry and patch mean and variance) were established according to the pattern of real changes in the calibration period. Transition rates for the simulation year (2020) were modified (Table 9.1) in accordance with the different trends of change forecast for the coming years (economic crisis) in the study area by the experts we interviewed.

Summing up, the two modelling exercises differ because of the transitions selected, the transition rates (quantity of change), the input data (SIOSE and CORINE maps and driving forces maps) and the expander and patcher parametrization (proportion of changes simulated as expansion, patch isometry and patch mean and variance). However, the land use change logic is the same for both exercises in that they follow the same methodological procedure with the same drivers of change.

9.3.3. DATA ANALYSIS AND ASSESSMENT

There is a great deal of academic research about scale and its influence on data. The most frequently used methods include fractal analysis, local variance method, variograms, wavelets or texture analysis methods (Cao and Siu-Ngan Lam 1997, Zong-Guo and Clarke 1997, Oliver 2001). Several studies have also used spatial metrics (Saura 2002, Wu 2004, Uuemaa et al. 2005), which allow us to analyse the effects of the scale of the input maps on the patterns being modelled. Numerous validation techniques have also been created in modelling research (Paegelow et al. 2014). They usually compare simulated maps with real maps in order to assess the fitness of the model. However, they can also be used to compare two maps and highlight their differences. The method proposed by Pontius and Millones (2011) to evaluate quantity and allocation disagreement is a good validation tool to analyse the differences between two maps. It shows two types of error: quantity and allocation (omission and commission) errors⁷.

We compared through this method the input maps (SIOSE and CLC) and real (2005-6 – 2011-12 cross tabulation) and simulated changes (2011-12 – 2020-21 cross tabulation). When comparing the input maps, we only analysed the land covers that took part in the modelled transitions. When comparing the changes, we only analysed the land covers that are actively modelled (i.e. the categories allocated by the model). The results highlight the differences between simulations in terms of quantity and allocation disagreement compared with the same disagreements between the SIOSE and CORINE Land Cover maps.

Spatial metrics were calculated using FRAGSTATS 4.2 for the evaluation of the pattern difference between input maps (SIOSE and CLC maps) as well as for the analysis of the pattern difference between real (2005-6 – 2011-12) and simulated changes (2011-12 – 2020-21). The metrics were selected according to the information that they provided, that is, according to the variability of their results. These metrics are: Total Area, Number of Patches, Largest Patch Index, Weighted Mean Patch Area, Area Coefficient of Variation, Mean Fractal Dimension, Proportion of Like Adjacencies and Patch Cohesion Index. A detailed description of each metric can be found in the FRAGSTATS help guide (McGarigal et al. 2015), in Leitão et al. (2012), as well as in the Technical Note B, at the end of this document.

⁷ For detailed information about the Pontius Jr's Matrix and the metrics that can be calculated through this tool, refer to Technical Note B.

9.4. RESULTS

9.4.1. QUANTITY DISAGREEMENT

9.4.1.1. Input maps

There is an important quantity disagreement between the input maps. This disagreement varies from one category to the next, as shown in Figure 9.4, where confusion bars represent the confusion of one input map with regard to the other for each category. Each confusion bar is divided into various sections, one for each category on the map. Each section of the bar represents the proportion of pixels that are allocated to a different category on the other map. When the section for any particular category (e.g. arable land) is larger on one confusion bar than on the other, this means that there is a quantity disagreement, which is equal to the difference between the two sections for that category. The rest of the disagreement is allocation disagreement.

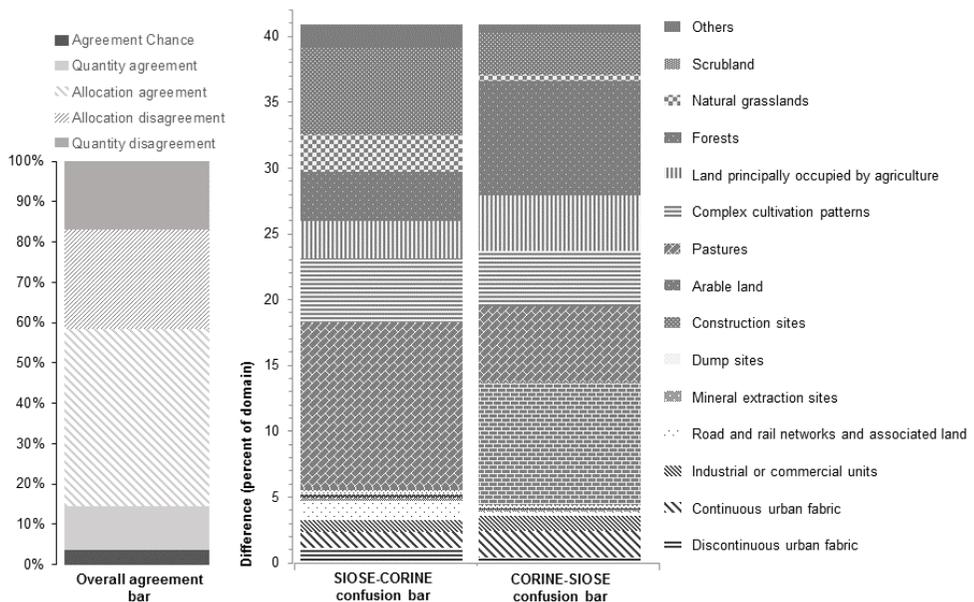


Figure 9.4. Agreement bars for input maps. The first bar depicts the overall components of agreement between the two maps. The second bar depicts the SIOSE disagreements with regard to CLC, and the third bar depicts the CLC disagreements with regard to SIOSE

These differences in quantities result from the fact that different Minimum Mapping Units (MMU) were used in the two input maps. When cartographic scale is reduced and the MMU is bigger, the polygons that do not meet the mapping criteria (MMU) must be absorbed by others with similar definitions (generalization process).

Categories with flexible definitions incorporate polygons from other categories and increase their area (e.g. discontinuous urban fabric, forests) whereas categories with rigid definitions lose polygons and their total area diminishes (e.g. areas with sparse vegetation, dump sites). João (2001) called this process “competition for map space”. It results in a disproportionately high representation of categories with flexible definitions and a low representation of categories with rigid definitions in maps at smaller scales with bigger MMU.

The categories that absorb other categories during the generalization process are different for the two input maps (e.g. arable land for CLC and pastures for SIOSE). This results in large quantity disagreements and allocation disagreements between the maps. This disagreement can be attributed to the use of different criteria in the generalization process for SIOSE (conducted by the author, as explained in section 9.3.1) and for CORINE Land Cover (conducted by the National Geographic Institute of Spain, as explained in section 9.2.2).

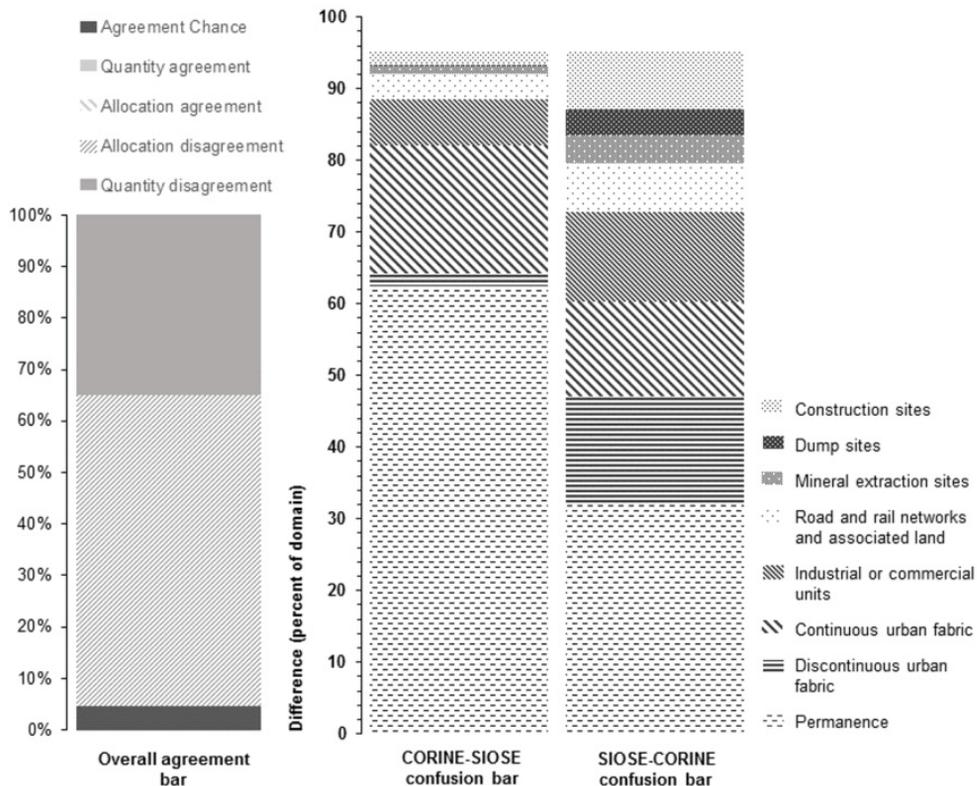


Figure 9.5. Agreement bars for simulated changes. The first bar depicts the overall components of agreement between the two maps. The second bar depicts the CORINE Land Cover simulation disagreements with regard to the SIOSE simulation, and the third bar depicts the SIOSE simulation disagreements with regard to the CORINE Land Cover simulation

9.4.1.2. Simulated changes

The simulated changes for the period 2011-12 – 2020-21 show a high degree of quantity confusion as illustrated in the bar chart included in the previous page (Fig. 9.5). The simulated changes are greater in SIOSE than in CLC because when the two calibration maps (2005-2006 and 2011-2012) were compared, there was a larger amount of change in SIOSE than in CLC. The MMU for SIOSE allows us to detect small changes, in addition to the changes it also detects for CORINE Land Cover. In consequence, the transition rates (Markov matrix obtained through comparison of the input maps) are greater for SIOSE than for CLC.

9.4.2. ALLOCATION DISAGREEMENT

9.4.2.1. Input maps

There is also a significant level of allocation disagreement between the input maps that varies from one category to the next. Mixed categories (complex cultivation patterns and land occupied above all by agriculture) show a high degree of error (Fig. 9.6). Because of the vague definition of these categories, real covers labelled as such are very different in the two input maps.

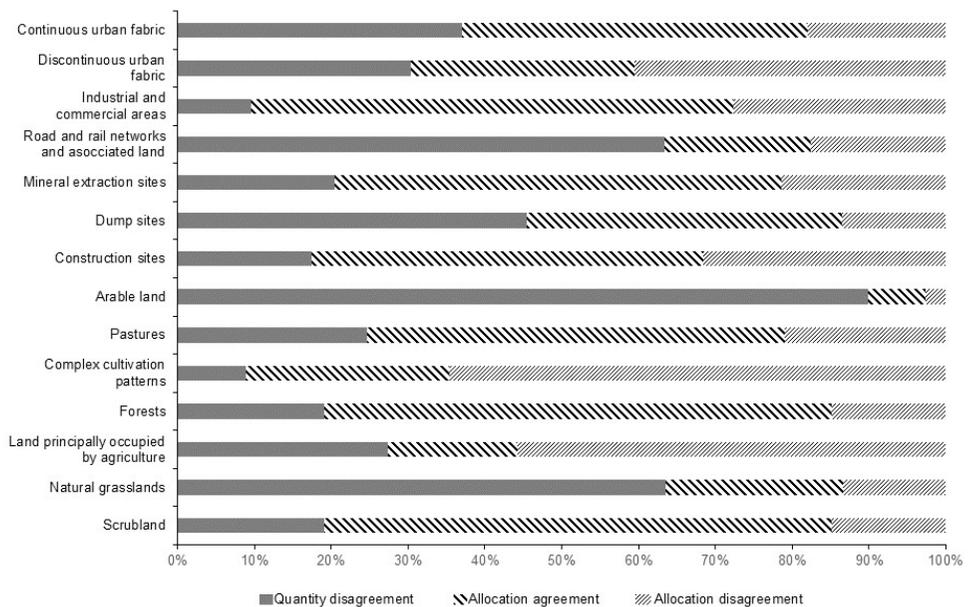


Figure 9.6. Agreement, quantity and allocation disagreement for categories in input maps (SIOSE and CLC)

Allocation disagreement analysis also provides information about which categories are confused with the quantity disagreement of other categories. We observed for example a relation in the error between pastures and arable lands and between continuous and discontinuous urban fabric. Visual comparison of the two LULC maps have proved this relation: some locations labelled as pastures in one map are classified as arable lands in the other. The same relation can be observed for continuous and discontinuous urban fabric. Therefore, the same covers are assigned to different categories on each map.

The model was set up on the basis of the definitions of the categories and expert knowledge. Same category definitions were considered independent of the modelling exercise and the same criteria were applied to them. Since the same categories do not represent the same covers in both exercises, different results were expected in the simulations. e.g. we used the same drivers for the transition from pastures to continuous urban fabric. However, the land allocated to these two categories is different in the two input maps (allocation disagreement in Figure 9.6).

9.4.2.2. Simulated changes

The agreement between changes in the two simulations is minimum (Fig. 9.7) and can be attributed purely to chance (Fig. 9.5)⁸. Most of the pixels allocated by the two calibrated models are in different positions.

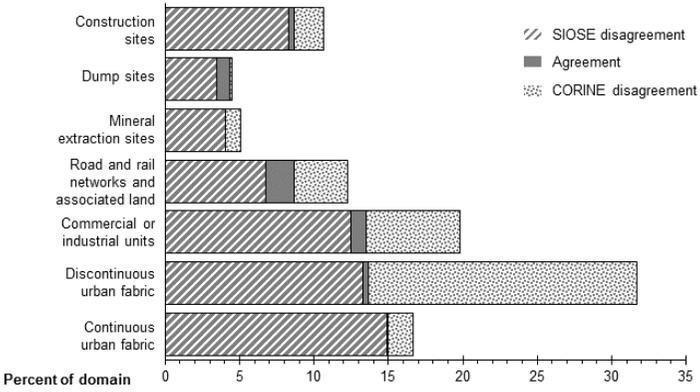


Figure 9.7. Agreement bars per category for changes in SIOSE and CORINE Land Cover simulations. SIOSE and CORINE Land Cover disagreements refer to changes simulated by each model that do not correspond to the same change in the other model

The disagreement is mostly (94% of total disagreement) related to persistence (i.e. areas with no change) on the other map: 62% of the confusion in the SIOSE simulation is with areas that do not change in the CLC simulation, whereas 32% of the confusion in the CLC simulation is with areas that do not change in the SIOSE simulation (Fig. 9.5). This is because of the allocation disagreement between input maps due to different category definitions, as pointed out in the previous section. The candidate areas (i.e. those in which

⁸ Part of this disagreement can be attributed to the stochasticity of Dinamica EGO, as explained in the Chapter 11.

transition is possible) are different in both models, whereas the drivers of change and therefore the candidate areas in which change is most likely, are very similar.

9.4.3. PATTERN DISAGREEMENT

9.4.3.1. Input maps

As expected, fragmentation (the number of patches or polygons) is greater in SIOSE than in CLC (Table 9.3). The smaller the MMU, the higher the number of patches. And the higher the number of patches, the smaller the weighted mean area (mean area corrected according to polygon size).

Therefore, SIOSE maps have more polygons and smaller polygons than CORINE maps. In consequence, SIOSE has more potential pixels to be modelled as an expansion of previous patches, whereas CLC is more sensitive to the patcher function. Any new patch modelled in CLC should meet the MMU criteria. If not, the simulation would result in a more fragmented landscape.

In short, in the case of input maps, more fragmented and complex patterns are expected at larger scales. At these scales the land cover information resembles the real situation more closely. This means that the SIOSE maps are more realistic, but also more complex and there is no relation between complexity and performance of the model. That is, more complexity does not mean better model performance (Clarke 2004, Wainwright and Mulligan 2013).

9.4.3.2. Simulated and real changes

Real changes (2005-6 – 2011-12) and simulated changes (2011-12 – 2020-21) show a different pattern. While the effect of MMU is evident in real changes (fewer and larger changing patches for CLC), it is practically non-existent in the simulations. The number of CLC patches increases with the simulation whereas the number of SIOSE patches falls (Table 9.4).

The proportion of like adjacencies and patch cohesion index, which measure the grouping of patches that belong to the same class (McGarigal et al. 2015), also show different results (Table 9.4). Simulated changes are more disaggregated than real changes, especially in the CLC simulation.

These different patterns between simulated and real changes are a consequence of the logic of the model. The pixel is the essential unit of work of any raster LUCC model, such that the location of the first change simulated will be the most suitable pixel for each specific transition. The pixel area is much smaller than the MMU (156m² vs 0.2-0.5ha in SIOSE and 0.25ha vs 25ha in CLC). The simulated changes will therefore be characterized by smaller (area-weighted mean patch area), more poorly connected patches (proportion of like adjacencies and patch cohesion index), when compared with the real changes, which are affected by the MMU rules.

Table 9.3. Class metrics from SIOSE and CLC maps

	Number of patches (NP)		Largest patch index (LPI)		Mean Patch Area-Weighted		Area coefficient of variation	
	SIOSE	CLC	SIOSE	CLC	SIOSE	CLC	SIOSE	CLC
Continuous urban fabric	100	22	0.468	0.2109	521.2025	269.9869	379.8538	135.419
Discontinuous urban fabric	815	94	0.0418	0.2762	15.9712	181.065	171.8313	160.946
Industrial or commercial units	657	59	0.129	0.4861	66.8406	427.5172	295.8965	201.6491
Road and rail networks and associated land	91	26	0.9313	0.0696	1645.6102	84.8598	705.1368	106.82
Mineral extraction sites	83	15	0.0428	0.0497	34.2393	68.5387	147.5139	68.1162
Dump sites	108	5	0.0464	0.0404	30.3907	57.7592	243.8299	56.7203
Construction sites	95	17	0.07	0.0694	52.9917	88.9033	187.5387	81.9385
Arable land	186	117	0.0773	2.1861	45.2817	2418.446	207.8323	401.5608
Pastures	1651	256	1.8602	6.0199	746.3756	6122.6768	516.1228	676.0464
Complex cultivation patterns	1221	145	0.4077	1.3211	140.598	1098.1782	387.2766	391.0417
Land principally occupied by agriculture	1371	174	0.0246	0.1352	10.4921	92.3475	119.5047	97.9302
Forests	1378	318	0.7864	1.263	359.9393	1051.2964	370.1635	264.7445
Scrubland	583	46	0.2976	0.1016	146.7024	104.3517	366.4032	114.0313
Natural grasslands	1046	199	0.498	0.6947	289.356	509.3823	350.1007	221.4825

Table 9.4. Class metrics from SIOSE (S) and CLC (C) simulations

Simulated changes 2011-2020	Total Area		Number of patches		Mean Patch Area-Weighted		Mean Fractal Dimension		Proportion of like adjacencies		Patch cohesion index	
	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C
Continuous urban fabric	191.5	23.0	44	13	10.7	3.4	1.1091	1.0618	89.7944	45.6522	95.0723	71.0631
Discontinuous urban fabric	174.9	235.0	79	88	11.9	16.6	1.1092	1.046	88.2103	65.4787	93.7738	80.4932
Industrial or commercial units	172.5	93.8	81	42	15.0	8.1	1.1241	1.0401	83.3288	58.8	95.7527	79.9843
Road and rail networks and associated land	111.3	71.0	15	4	14.5	32.4	1.1997	1.1959	84.6364	61.7958	96.4041	92.4082
Mineral extraction sites	51.4	13.5	35	5	1.9	3.5	1.1194	1.0565	81.6109	61.1111	90.3935	72.052
Dump sites	55.2	13.5	11	4	7.7	5.2	1.111	1.0502	89.8641	64.8148	94.9689	77.3581
Construction sites	111.3	30.8	118	26	3.3	2.9	1.1351	1.0488	76.8815	43.4959	90.2173	63.8639
Total	868.1	480.5	383	182								
Real changes 2005-2011	Total Area		Number of patches		Mean Patch Area-Weighted		Mean Fractal Dimension		Proportion of like adjacencies		Patch cohesion index	
	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C
Continuous urban fabric	316.5	40.3	72	4	19.5	12.5	1.0915	1.0616	91.7189	77.9503	96.4369	86.0809
Discontinuous urban fabric	164.1	304.8	130	19	11.6	43.5	1.071	1.0651	87.813	82.5267	93.5797	92.4059
Industrial or commercial units	410.3	265.5	130	23	26.3	34.0	1.0821	1.0906	91.8907	76.2241	95.7127	89.8172
Road and rail networks and associated land	56.6	35.8	8	1	13.3	35.8	1.205	1.1439	81.9299	79.021	96.6727	93.0449
Mineral extraction sites	102.4	28.0	64	2	5.3	18.9	1.0926	1.1069	86.3387	75.8929	92.89	88.8021
Dump sites	75.7	27.0	34	8	5.6	7.3	1.1018	1.0448	87.4329	64.3519	93.4537	80.6492
Construction sites	628.3	391.5	95	10	37.7	83.3	1.1118	1.0904	91.2315	84.7063	97.3597	95.4769
Total	1754.0	1092.8	533	67								

The bigger the contrast between the MMU and the spatial resolution (pixel size), the more evident the fragmentation in the simulation. This means that compact input maps are more sensitive to model allocation change than fragmented input maps.

As regards the total area, in both cases, the proportion of modelled changes compared to real changes (Table 9.4) is higher than the proportion of selected transition rates with regard to original rates (Table 9.2). This is due to the transition rates function, which estimates the real changes through a Markov Matrix. This introduces a new source of uncertainty into the model. The estimated changes are different depending on the model and method used (Mas et al. 2011).

9.5. DISCUSSION

9.5.1. DATA SETS UNCERTAINTY

The study area can be displayed in very different ways depending on the cartographic source used, even though they are apparently similar. Previous studies have proved this by analysing several data sets for the same area (Waser and Schwarz 2006, Schmit et al. 2006, García Martínez et al. 2015).

In our study case, SIOSE and CLC showed big dissimilarities despite the fact that one map was obtained from the other by generalization. The only differences between the input maps are the cartographic scale, Minimum Mapping Unit (MMU), Minimum Polygon Width (MPW) and generalization criteria. It is these factors therefore that cause the maps to provide dissimilar information.

More transparency is required with regard to the generalization process used in CORINE Land Cover. Although we have based our SIOSE generalization on CLC class definitions, as described in its technical specifications, important disagreements appear due to the different generalization criteria. More information about how CLC was obtained from SIOSE would result in more correspondence between the two maps.

Uncertainty analysis of the input data should be a critical step in modelling research, as shown by Verburg et al. (2011) and Pai and Saraswat (2013). Nevertheless, when addressing this problem of uncertainty, researchers usually present accuracy rates obtained by error analysis based on data gathered in the field. These general rates can vary widely across local areas and categories. This means that the extent and the thematic resolution of the analysis must be chosen carefully.

In our study case, most of the errors come from confusion between the following classes: scrub and grasslands; pastures and agricultural areas; and continuous and discontinuous urban fabric. A simplified legend which grouped these categories together into larger, more broadly-defined classes would remove these errors. This confirms the ideas of Versteegen et al. (2012), who pointed out that uncertainty is usually lower at coarser scales since local changes are omitted. Given that some level of generalization is always needed because of the impossibility of representing the real situation exactly on a scale

map, it is sometimes better for input maps to ensure greater accuracy even if this means less detail. Hence, smaller scales and bigger MMU are sometimes preferable.

9.5.2. MODEL PARAMETERS

Maps at finer scales (smaller MMU) provide more detailed information and, ergo, show more changes. Consequently, different rates of change and potential transitions are obtained. Similar results have been noted for the analysis of other components of scale such as extent (Bhatti et al. 2015) or thematic resolution (Pontius Jr. and Malizia 2004, Conway 2009).

Fine scale maps can be useful for local studies, because they provide essential detailed information about local dynamics (Wang and Marceau 2013; Zhao 2013). However, the probability of error as noise in maps at finer scales is higher. The probability of introducing this noise into the model is also greater (Blanchard et al. 2015).

At finer scales, transitions rarely occur alone and different processes or transitions happen simultaneously (Wang and Marceau 2013). The patterns of change are also more complex. This makes calibration of the model more challenging and errors more likely. Sometimes simpler models work better (Clarke 2004; Wainwright and Mulligan 2015). In fact, if the drivers of change are simple and we cannot explain the local changes, as in SIOSE, input maps at coarser scales and with bigger MMU are advisable.

Applying the same criteria to the two calibrated models results in different simulated changes because the models do not show the same dynamics. More detailed knowledge is required to enable the model to be properly calibrated with SIOSE data since the experts only considered the main dynamics in the study area and, therefore, ignored most of the small changes. However, CORINE Land Cover mapping rules do not fit well with the size of most of the changes in the study area. Neither system offers a perfect data set and consequently the modeller must try to strike a balance between generality, precision and realism (O'Sullivan and Perry 2013).

Explanatory drivers of change vary with the scale (Verburg et al. 2003; Moreira et al. 2009; Bhatti et al. 2015). However, in this case the two scales of analysis (both local-regional) are too similar to be affected by contrasting driving forces. Nonetheless, additional driving forces could be included in the exercise with SIOSE as input maps because of the additional local processes involved in this exercise.

Explanatory factors were the same for both modelling exercises and the maps were very similar: same source but different scale. The variations resulting from these different scales are essentially a question of the degree of precision in the location of attributes. Consequently, the areas with the greatest transition potential for each land cover are similar in both modelling exercises despite the substantial differences in land cover information. As a result, an area with high transition potential could be located under a particular land cover in one case and under a different one in the case. This results in significant incoherence between LULC maps and driving forces. Making driver maps from

LULC maps is an alternative way to achieve coherence in the datasets that define the model. However, this would limit the variety of drivers.

9.5.3. MODELLED PATTERN

The changes in the LULC pattern are similar in both modelling exercises, regardless of the MMU. The simulated pattern is always more fragmented than the initial pattern and this is more obvious when the pattern of the initial map is more compact.

As explained in section 9.4.3.2, model allocation function allocates changes as pixels whereas input maps only measure changing polygons that meet the MMU criteria. Input map resolutions do not fit the MMU rules. Consequently, the simulated landscape is more fragmented than the real one and this is clearer for the CORINE Land Cover simulation because of its larger MMU.

The patcher and expander functions of Dinamica EGO can be parametrized (mean area and variance of simulated polygons) to achieve the simulation pattern we want. Although some studies have proved effective (Soares-Filho et al. 2003), this did not work in our study area. The transitions modelled are only possible when there is a suitable area (obtained from the drivers) inside the polygons of the destination category for the transition. If this happens, the model then considers the user's parameters. Suitable areas for specific transitions are going to be smaller in applications at large cartographic scales (smaller MMU) than in applications at smaller cartographic scales (bigger MMU) because of the respective size of the polygons in each exercise. It is therefore more difficult to vary the modelled patterns in exercises with fine scales.

Finer spatial resolution applications show problems in the allocation process because real changes tend to take place in a group of pixels. Applications at coarser spatial resolutions are more suited to deal with these problems (Kocabas and Dragicevic 2006, Blanchard et al. 2015). Thus, there is a relation between the behaviour we observed in our exercises and their spatial resolution, which is related to the cartographic scale and MMU of the input data. Although the rasterization method we followed (Hengl 2006b) links the chosen spatial resolution with the cartographic scale and the MMU, there is still an inconsistency between the two in the model. Some authors have proposed patch-based models to solve this problem (Wang and Marceau 2013). There is also a wide body of literature about spatial resolution influence in LUCC modelling (mainly CA-based models), which reaches similar conclusions (Marceau et al. 2005, Pan et al. 2010, Blanchard et al. 2015).

9.5.4. ALLOCATION DIFFERENCES

Although one might imagine that the higher quantity of change detected by input maps would result in a simulation that was closer to the true situation, this is not always the case. The transition rates could result from changes caused by different processes. However, the driving forces defining the most likely transition areas were the same for both

modelling exercises. As a result, the exercise at finer scale (SIOSE) could extrapolate changes from one process to changes from other processes, e.g. both simulations allocated changes in 'Dump sites' in the area around the central dump in Asturias, forecasting expansion of this dump. Over the calibration period CLC only detected changes in this area, while SIOSE also detected changes in other parts of the study area, resulting from other processes such as road building works.

Regarding the spatial resolution, modelling exercises at finer spatial resolutions simulate more pixels than modelling exercises at coarser spatial resolutions. This means that the possibility of error in the two cases is different. The larger the quantity of pixels to allocate, the more likely the model is to make a mistake. Validation is therefore dependent on the spatial resolution of the exercise. We must not compare errors in modelling exercises with different spatial resolutions.

Finally, the difference between pixel-based modelling and MMU rules must also be borne in mind in the validation step. Many modelling exercises are validated by LULC maps that follow MMU rules (Paegelow and Olmedo 2005, Pontius Jr. and Malanson 2005, Pérez-Vega et al. 2012). Changes that do not obey these rules do not appear on the map. However, changes simulated by the model will be located in the most suitable area, regardless of the minimum area of these changes. This means that real changes could be considered as errors in validation analysis.

9.6. CONCLUSION AND OUTLOOK

Model results can vary greatly depending on the cartographic scale and minimum mapping unit of the input data.

Most of the uncertainty comes from the differences between the input maps. The choice of a suitable cartographic source is therefore crucial. In-depth research must be done on this issue, comparing different cartographic sources and their influence on land cover representation. Great care must also be taken with the generalization of LULC maps, since most of their dissimilarities result from different generalization criteria.

Minimum mapping unit affects the quantities of change obtained and selected transitions since maps with smaller MMU measure more changes and more varied ones. This makes the resulting modelling exercise more complex. If the user cannot manage this complexity properly, it will produce more uncertainty, because most of the analysed change is not interpreted in the model. Thus, the modeller must strike a balance between model complexity and its explanatory power.

Modelled patterns are also dependent on spatial resolution. This is linked with the minimum mapping unit: small MMU imply finer spatial resolution than larger units. Big differences between pixel size and MMU result in more fragmented scenarios. Patch-based models can be a solution to this problem.

Other components of scale, such as extent or thematic resolution, also influence modelling results and changes in these components could help resolve some of the problems we encountered, such as LULC input map disagreement. Therefore, in-depth research

must focus on the influence of scale in modelling and, especially, on the relation between the different meanings of scale and their general influence on modelling.

Capítulo 10

Consecuencias de la elección de la resolución temática en la calibración de un modelo del cambio de usos y coberturas del suelo ¹

10.1. INTRODUCCIÓN

Cuando se representa el territorio en un mapa, siempre se realiza un proceso de abstracción del mismo debido a la imposibilidad de trasladar la complejidad de la superficie terrestre al papel. Del mismo modo, la conceptualización de cualquier proceso terrestre en un modelo implica también su abstracción. En ambos casos, esa simplificación de la realidad para hacerla manejable supone un cierto grado de incertidumbre, la cual debe de evaluarse de cara a comprender la significatividad de los resultados de nuestro estudio.

La escala, entendida como la dimensión espacial, temporal, analítica o cuantitativa utilizada para el estudio y medición de cualquier fenómeno (Gibson, Ostrom y Ahn, 2000) es, en todo estudio espacial, la herramienta clave que determina el grado de abstracción alcanzado². Es así una ventana de percepción de la realidad que explicita la limitación de nuestro entendimiento total de la misma (Wu y Li, 2009). Como parte de la escala y vinculado a este concepto, Castilla et al. (2009) señalan la necesidad de considerar la resolución temática, también conocida como escala categórica o temática. Hace referencia al número de clases en las que se diferencia la información en los mapas categóricos y, por ende, al detalle empleado en la definición de esas clases (Gounaridis y Koukoulas, 2016). Para un mismo territorio, cuanto mayor sea el número de categorías empleadas para representarlo, mayor será la resolución temática. Al representarse la misma superficie a partir de una mayor cantidad de clases, el espacio al que hace referencia cada una es más concreto, es decir, se trata de superficies más homogéneas y mejor diferenciadas entre sí.

Se ha demostrado la influencia de la resolución temática en la delimitación de coberturas del suelo (Pérez-Hoyos y García-Haro, 2013), la evaluación de los cambios territo-

¹ Este capítulo ha sido publicado como parte de las actas del XXV Congreso de la Asociación de Geógrafos Españoles.

García-Álvarez D, Camacho Olmedo MT (2017) Consecuencias de la elección de la resolución temática en la calibración de un modelo de Usos y Coberturas del Suelo. En: Allende Álvarez F, Cañada Torrecilla R, Fernández-Mayorales G, et al. (eds) Naturaleza, Territorio y Ciudad en un Mundo Global. Actas del XXV Congreso de la Asociación de Geógrafos Españoles. UAM Ediciones, Madrid, pp 1275–1284

² Para una detallada definición y caracterización de la escala, véase el Capítulo 6.

riales (Aldwaik, Onsted y Pontius, 2015), o el cálculo de las métricas de ecología del paisaje (Šímová y Gdulová, 2012), si bien estudios evaluando la influencia de la resolución temática en los análisis y datos geoespaciales son aún escasos (Ju, Gopal y Kolaczyk, 2005). En el caso de la Modelización del Cambio de los Usos y Coberturas del Suelo (*Land Use Cover Change Modelling*, LUCCM), aunque se ha demostrado la influencia de la resolución temática en el proceso de calibración del modelo (Conway, 2009), aún no se ha realizado un análisis integral que evalúe este aspecto.

Los estudios realizados hasta el momento carecen del detalle necesario: en algunos casos no se evalúa la influencia de la resolución temática en el patrón simulado (Conway, 2009); la mayor parte de los estudios coinciden en comparar ejercicios de modelización a bajas resoluciones temáticas, que en ningún caso alcanzan la amplia variedad de detalle temático hoy en día posible (Dietzel y K. Clarke, 2006; Zhao, 2011). Además, en algunos casos, se hace uso de modelos, como SLEUTH (Dietzel y K. Clarke, 2006), cuyas conclusiones, por su especificidad, resultan difícilmente extrapolables al resto de modelos basados en autómatas celulares o, en general, a cualquier modelo del Cambio de los Usos y Coberturas del Suelo (*Land Use Cover Change*, LUCC).

Con todo, el objetivo de este capítulo pasa por evaluar de manera integral el efecto que tiene la resolución temática en la calibración de un modelo LUCC. Para ello, se ha empleado la base de datos SIOSE para obtener cuatro mapas³ de Usos y Coberturas del Suelo (*Land Use Land Cover*, LULC) a diferente resolución temática. Estos mapas se han empleado como base para la calibración de Metronamica a cuatro resoluciones temáticas distintas. La diferencia entre las calibraciones se ha evaluado a partir de la distinta cantidad y tipología de cambios de los mapas de partida (SIOSE 2005-2011), así como en función de la complejidad y variedad del patrón simulado en cada ejercicio de modelización.

10.2. ÁREA DE ESTUDIO Y MATERIALES

El ámbito de estudio se corresponde con el Área Central de Asturias (ACA)⁴, definida de acuerdo a lo establecido en las *Directrices Regionales de Ordenación del Territorio* (Fig. 10.1). Queda conformada por un conjunto de núcleos urbanos de diverso tamaño, interrelacionados entre sí y vinculados a los distintos espacios de carácter industrial o comercial que se desarrollan en sus entornos y en el centro del área estudiada. Ambos tipos de usos, urbanos e industriales, protagonizan los principales cambios territoriales en Asturias. De ahí la necesidad de estudiarlos y arrojar luz acerca de sus posibles dinámicas futuras.

³ Como se ha planteado en el Capítulo 3, se utiliza el término “mapa” como sinónimo de capa espacial de información geográfica. Sin embargo, en un sentido estricto, este término se refiere únicamente al producto cartográfico obtenido una vez manipulada la información geográfica y presentada de tal forma que se facilita su comunicación (Feranec 2016).

⁴ Para una descripción detallada del área de estudio, véase el Capítulo 2.

Dos mapas para los años 2005 y 2011 han sido utilizados en los ejercicios de calibración. Ambos fueron generados a partir de la base de datos SIOSE. Ésta fue depurada de acuerdo con la metodología propuesta por Delgado Hernández (2016), a fin de obtener un mapa LULC en el que cada polígono quedase definido por una única categoría o etiqueta. Más información acerca de SIOSE y las características de esta base de datos puede encontrarse en Valcárcel Sanz y Castaño Fernández (2012) y en los capítulos 7, 8 y 9 de esta investigación.

Una vez obtenido un mapa con el mayor detalle temático posible, éste fue sucesivamente reclasificado hasta obtener cuatro mapas con distintas leyendas, es decir, con diferente resolución temática (Fig. 10.1 y Tabla 10.1). Los mapas, en formato vectorial, fueron rasterizados a una resolución espacial de 50m. Ésta fue escogida de acuerdo con las recomendaciones del modelo LUCC utilizado (RIKS, 2012) y la propuesta de Hengl (2006) para seleccionar la resolución espacial que mejor se ajusta a la escala cartográfica y unidad mínima cartografiable del mapa vectorial original.

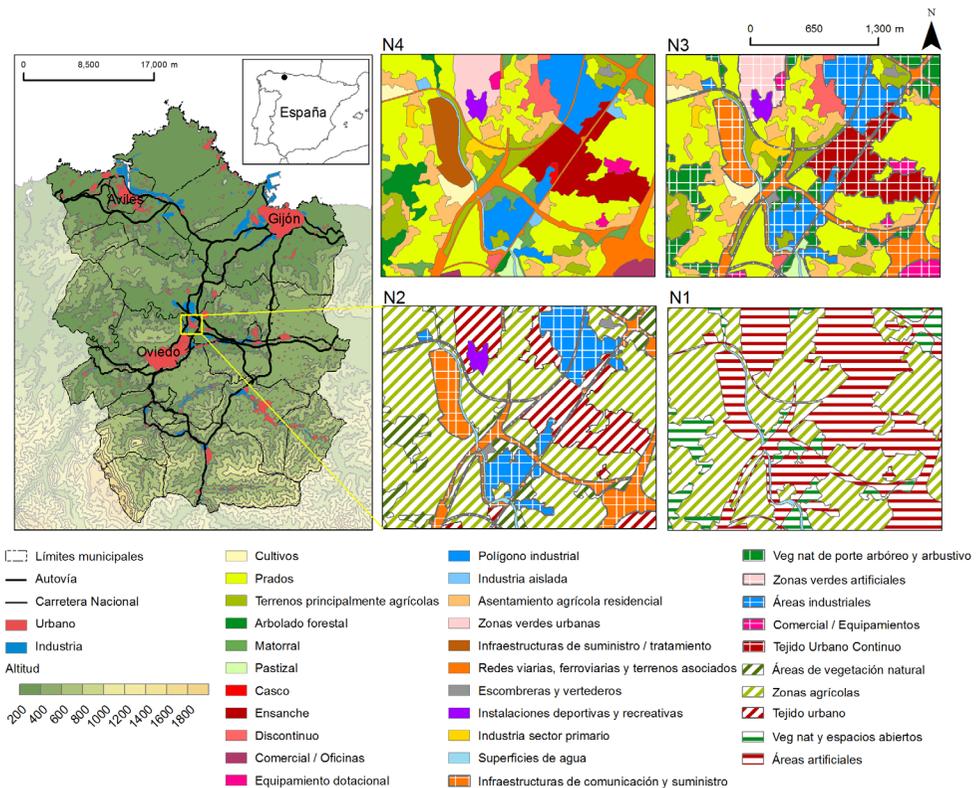


Figura 10.1. Mapa de localización del área de estudio y relación de los mapas utilizados a diferentes resoluciones temáticas para un ámbito de ejemplo del área de estudio (Lugones-Llanera). Fuentes: BCN 1:200.000; MDT 25m; SIOSE 2011 (IGN)

10.3. METODOLOGÍA

10.3.1. METRONAMICA

Metronamica⁵ es el modelo escogido para realizar cuatro calibraciones a distinta resolución temática. Es un modelo LUCC de autómatas celulares que distingue entre tres tipos de categorías o clases: clases que son modeladas activamente (clases *function*); clases que se modelan de manera pasiva una vez las *function* han sido localizadas (clases *vacant*); y clases que no cambian durante la simulación (*features*).

La idoneidad para el cambio (*Transition Potential*) de un determinado pixel se define para las clases *function* a partir de cuatro factores (1): reglas de vecindad (R), aptitud (S), accesibilidad (A) y planificación (Z), a los que se suma un componente estocástico (α) a fin de incorporar la aleatoriedad que es consustancial a cualquier fenómeno dependiente de decisiones humanas (RIKS, 2012). A continuación, la localización de las clases *vacant* se realiza (2) según el factor aptitud (S) y la inercia (I) de esa clase a permanecer invariable (valor de 0 a 1).

$${}^tP_{f,c} = {}^tS_{v,c} \cdot I_{v, tLU_c} \quad (1)$$

Dónde ${}^tP_{f,c}$ es el valor del potencial de transición para la clase *vacant* v en la celda c , ${}^tS_{v,c}$ la idoneidad física para la clase *vacant* v en la celda c , y I_{v, tLU_c} el valor de inercia / conversión para la clase *vacant* v en la celda c .

$${}^tV_{f,c} = \begin{cases} {}^tR_{f,c} \cdot (1 + e) & \text{if } \alpha > 0 \\ {}^tR_{f,c} & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

$${}^tP_{f,c} = \begin{cases} {}^tV_{f,c} \cdot {}^tS_{f,c} \cdot {}^tZ_{f,c} \cdot {}^tA_{f,c} & \text{if } {}^tV_{f,c} > 0 \\ {}^tV_{f,c} \cdot (2 - {}^tS_{f,c} \cdot {}^tZ_{f,c} \cdot {}^tA_{f,c}) & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

Donde ${}^tR_{f,c}$ indica el efecto de vecindad (*neighbourhood effect*) para la clase *function* f en la celda c , α es el componente aleatorio del modelo definido por el usuario (0-1), e el valor obtenido por una distribución Weibull para el cálculo del componente aleatorio, ${}^tS_{f,c}$ la idoneidad física para la clase *function* f en la celda c , ${}^tZ_{f,c}$ el valor de los planes de ordenación del suelo para la clase *function* f en la celda c , ${}^tA_{f,c}$ la accesibilidad para la clase *function* f en la celda c y ${}^tP_{f,c}$ el valor del potencial de transición para la clase *function* f en la celda c .

⁵ Para una descripción detallada del modelo Metronamica, véase la Nota Técnica A.

Las reglas de vecindad definen la atracción y repulsión entre cada clase *function* y el resto de coberturas presentes en el mapa, de acuerdo con un tipo de vecindad Moore de 400 metros de tamaño máximo (8 píxeles). El factor accesibilidad muestra la idoneidad de un píxel para el cambio según su proximidad a las principales vías y nodos de comunicación. Por su parte, la aptitud define la idoneidad para el cambio de un píxel según las características biofísicas del territorio (pendientes, altitud...). Finalmente, la planificación establece las restricciones e incentivos para el cambio recogidos en los planes de ordenación. Mientras que el primer y último factor pueden adquirir cualquier valor, sin límite de escala, en el caso de las variables accesibilidad y aptitud, el rango de valores permitidos es de 0 a 1.

En Metronamica, las demandas de las clases *function* son introducidas de manera manual por parte del usuario. Es decir, no se incorpora ningún método para el cálculo de la cantidad de cambio. En lo que respecta a su localización, Metronamica, de acuerdo a los valores de potencial de transición, localiza primero las clases *function* en las zonas de mayor idoneidad. Posteriormente, localiza las clases *vacant* en los pixels restantes, mientras que las *features* permanecen invariables⁶.

10.3.2. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN

Se realizó una calibración para cada ejercicio de modelización realizado sobre el periodo 2005-2011. Se trata de una calibración para cada mapa LULC obtenido para las mismas fechas (Tabla 10.1).

Las demandas fueron extraídas en cada caso a partir de los cambios medidos, para el periodo de calibración, por los mapas LULC a cada nivel de resolución temática (t_1-t_0). En todos los casos, la calibración se realizó a partir de la información proporcionada por entrevistas a expertos en el área, así como a través de una revisión de la literatura académica sobre el ámbito de estudio. Una vez definidos los parámetros iniciales, se realizó un ajuste manual de cada ejercicio de calibración, hasta obtener el mejor resultado posible de acuerdo con los índices y métodos de validación utilizados. En este sentido, se ha seguido el procedimiento estándar de calibración de Metronamica descrito en Van Delden et al. (2012) y Hewitt et al. (2014).

El programa Map Comparison Kit (MCK) fue utilizado para el cálculo de las distintas medidas de validación. Éstas son la métrica espacial Clumpiness⁷ así como los estadísticos Kappa, Kappa Simulation, que corrige el anterior para solo tener en cuenta las zonas que cambian, y Fuzzy Kappa Simulation, que computa dentro del acierto los cambios erróneos que se encuentran espacialmente próximos a los reales⁸ (van Vliet *et al.*, 2013). Sus valores fueron comparados con los de un escenario generado de manera aleatoria a fin de evaluar el poder predictivo del modelo.

⁶ Para conocer del proceso de localización de las clases en Metronamica, véase la Nota Técnica A.

⁷ Para una descripción de la métrica Clumpiness, véase la Nota Técnica B.

⁸ Para una descripción de los estadísticos Kappa, véase la Nota Técnica B.

Con el objetivo de evaluar las diferencias entre las distintas calibraciones, se calculó para cada par de mapas LULC y tipo de categoría (*vacants, functions y features*) el cambio total, absoluto y el intercambio (*swap*) real entre clases a partir de la crostabulación de los mapas SIOSE para los años 2005 y 2011. Por su parte, para evaluar el patrón modelado, se calculó la autocorrelación Mooran de los cambios⁹, excluyendo la persistencia, simulados en cada caso.

Tabla 10.1. Leyendas de los cuatro mapas utilizados en cada ejercicio de calibración

N4	N3	N2	N1	
Casco	Tejido urbano continuo	Tejido urbano	Superficies artificiales	
Ensanche				
Discontinuo	Tejido urbano discontinuo			
Suelo no edificado	Suelo no edificado			
Zonas verdes urbanas	Zonas verdes artificiales			
Cementerio				
Comercial / oficinas	Comercial / Equipamientos			
Equipamiento dotacional				
Polígono industrial	Industria			Áreas industriales
Industria aislada				
Infraestructuras de suministro / tratamiento	Infraestructuras de comunicación y suministro	Infraestructuras de comunicación y suministro		
Redes viarias, ferroviarias y terrenos asociados				
Zonas portuarias				
Aeropuertos				
Zonas de extracción minera	Zonas de extracción minera	Zonas de extracción minera		
Escombreras y vertederos	Escombreras y vertederos	Escombreras y vertederos		
Instalaciones deportivas y recreativas	Instalaciones deportivas y recreativas	Instalaciones deportivas y recreativas		
Industria sector primario	Industria sector primario	Zonas agrícolas	Zonas agrícolas	
Asentamiento agrícola residencial	Asentamiento agrícola residencial			
Cultivos	Cultivos			
Prados	Prados			
Terrenos principalmente agrícolas, pero con importantes espacios de vegetación natural y semi-natural	Terrenos principalmente agrícolas, pero con importantes espacios de vegetación natural y semi-natural			
Árbolado forestal	Vegetación natural de porte arbóreo y arbustivo	Áreas de vegetación natural	Vegetación natural y espacios abiertos	
Matorral				
Pastizal	Pastizal			
Playas, dunas y arenales	Playas, dunas y arenales	Espacios abiertos con poca o sin vegetación		
Espacios abiertos con poca o sin vegetación	Espacios abiertos con poca o sin vegetación			
Superficies de agua	Superficies de agua	Superficies de agua	Superficies de agua	
*Clases función		*Clases vacant		

⁹ Para una descripción del índice de Moran's I, véase la Nota Técnica B.

10.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

10.4.1. VARIACIÓN DE LAS DEMANDAS

Tal y como ha sido señalado con anterioridad (Dietzel y K. C. Clarke, 2006; Conway, 2009), una de las principales consecuencias del cambio de resolución temática en la calibración de un modelo LUCC es la variación de las demandas (Tabla 10.2). A menores resoluciones temáticas, las clases están formadas por un agregado de categorías de mayor detalle (Tabla 10.1). En consecuencia, las clases simuladas son más heterogéneas y de definiciones más vagas. De este modo, forman parte de ellas coberturas que, en mapas de mayor desarrollo temático, no son simuladas (ej. infraestructuras). Mientras en el primer caso sus cambios no son tenidos en cuenta, al ser estas categorías interpretadas como *features*, no es así en los modelos de menor resolución temática, donde los cambios de esas coberturas, al ser parte de la clase simulada (*function*), deben ser modelados. Lógicamente, cuanto mayor sea el número de cambios a simular, mayores serán las demandas.

Tabla 10.2. Distintas demandas (entre paréntesis) de las clases *function* para cada una de las calibraciones realizadas.

N4	N3	N2	N1
Casco (8)	Tejido urbano continuo (499)	Tejido urbano (2157)	Superficies artificiales (4390)
Ensanche (491)			
Discontinuo (208)	Tejido urbano Discontinuo (208)		
Suelo no edificado (-61)	Suelo no edificado (-61)		
Comercial / oficinas (133)	Comercial / Equipamientos (235)		
Equipamiento dotacional (102)	Tejido urbano N2 (881)		
Polígono industrial (1440)	Industria (1356)	Áreas industriales (1356)	
Industria aislada (-84)			
Áreas industriales N2 (1356)	Áreas industriales N2 (1356)	Superficies artificiales N1 (2623)	
Superficies artificiales N1 (2237)	Superficies artificiales N1 (2237)		
Asent. agrícola residencial (479)	Asent. agrícola residencial (479)		

El incremento de las demandas implica, por tanto, la necesidad de simular correctamente los nuevos tipos de cambios añadidos al modelo (ej. cambios de zonas agrícolas o vegetación natural a infraestructuras en el modelo N1). Sin embargo, en tanto los modelos son simples abstracciones de la realidad, que simulan los principales procesos de cambio del área de estudio, resulta difícil que la reducción de la resolución temática se acompañe de la correcta explicación de las dinámicas de cambio secundarias asociadas a la variación de la resolución. A modo de ejemplo, en el modelo N2 la clase “tejido urbano” se simula con parámetros similares a los utilizados para la clase “tejido urbano continuo” del modelo N3.

En consecuencia, el incremento de las demandas derivado de la disminución de la resolución temática supone un aumento de las posibilidades de acierto del modelo: cuenta con más píxeles para localizar, grosso modo, las mismas dinámicas de cambio. Así, para

las simulaciones obtenidas calibrando el modelo a menores resoluciones temáticas, el Kappa Simulation muestra un notable descenso si las demandas introducidas son las mismas que en la calibración a mayor resolución (ej. 2237 pixels de superficies artificiales en la calibración N1). El Kappa Simulation de la simulación N1 pasa de 0.254 a 0.177 cuando se ejecuta con las mismas demandas que la calibración N4 (Tabla 10.3). Al tener más oportunidades de localizar correctamente los mismos cambios, el aumento de las demandas por la variación de la resolución temática supone una mejora de los índices de validación.

Tabla 10.3. Estadísticos Kappa obtenidos en cada calibración a partir de la comparación del escenario simulado con el mapa SIOSE para el año 2011

	N4	N3	N2	N1
<u>Estadísticos globales</u>				
Kappa Simulation	0.173	0.083	0.125	0.173
Fuzzy Kappa Simulation	0.178	0.088	0.131	0.182
Kappa	0.898	0.958	0.964	0.965
<u>Clases Vacant</u>				
Cultivos	-0.002 (0.23%) ¹	0.022 (0.23%)	0.157 (0.62%)	0.200 (1.57%)
Prados	0.158 (1.18%)	0.141 (1.18%)		
Terrenos principalmente agrícolas	0.034 (0.95%)	0.039 (0.95%)	0.036 (0.98%)	0.038 (1.27%)
Arbolado forestal	0.219 (2.52%)	0.039 (1.16%)		
Matorral	0.197 (2.69%)			
Pastizal	0.001 (0.5%)	-0.000 (0.5%)		
<u>Clases Function</u>				
Casco	0.133 (0.003%)	0.188 (0.18%)	0.183 (0.34%) ² 0.231 (0.34%) ³	0.177 (1.24%) ² 0.254 (1.24%) ³
Ensanche	0.217 (0.18%)			
Discontinuo	0.018 (0.15%)	0.021 (0.15%)		
Suelo no edificado	0.098 (0.03%)	0.122 (0.03%)		
Comercial / Oficinas	0.178 (0.03%)	0.048 (0.06%)	0.435 (0.26%) ² 0.441 (0.26%) ³	
Equipamiento dotacional	0.073 (0.03%)			
Polígono industrial	0.396 (0.24%)	0.447 (0.27%)		
Industria aislada	0.104 (0.10%)			
Asentamiento agrícola residencial	0.055 (0.27%)	0.059 (0.27%)		

¹Los porcentajes entre paréntesis hacen referencia a la cantidad de cambio que representa esa clase respecto al paisaje total con permanencia, ²Mismas demandas, ³Diferentes demandas según la resolución temática

En el caso de Metronamica, donde las demandas son introducidas manualmente por el usuario, esta fuente de incertidumbre puede ser controlada según el criterio del modelador. Sin embargo, en el caso de modelos que cuentan con mecanismos de cálculo de las cantidades de cambio, como los basados en las cadenas de Markov (ej. CA_Markov, Land Change Modeler o Dinamica Ego)¹⁰, debe tenerse presente la incertidumbre asociada al nivel de resolución temática en el cálculo de las demandas si estas no se introducen de manera manual por parte del usuario.

¹⁰ Véase la Nota Técnica A para conocer, en detalle, la forma en la que estos modelos llevan a cabo el cálculo de las cantidades a simular.

10.4.2. CANTIDAD Y TIPOLOGÍA DE LOS CAMBIOS QUE TIENEN LUGAR

Cuanto mayor es la resolución temática, mayor es la cantidad de cambios susceptibles de ser simulados (Tabla 10.4). Un mayor número de clases supone la posibilidad de más interacciones entre ellas, es decir, de más intercambios. Éstos quedan anulados a menores resoluciones temáticas. A modo de ejemplo, los intercambios entre “escombreras y vertederos” y “tejido urbano” quedan anulados en la calibración N1 al formar ambas clases parte de la misma categoría.

Tabla 10.4. Relación de cambios en los mapas de referencia SIOSE (2005-2011). Los cambios aparecen representados como porcentajes respecto al total del mapa.

	N4	N3	N2	N1
Cambio neto total*	4.71%	2.19%	1.80%	1.63%
Cambio bruto total** de todas las clases	10.43%	6.30%	4.78%	4.26%
Cambio bruto total de las clases <i>vacant</i>	8.06%	4.02%	2.90%	2.84%
Intercambios*** entre clases <i>vacant</i>	3.75%	1.90%	1.10%	1.14%
Cambio bruto total de las clases <i>function</i>	1.04%	0.97%	0.65%	1.24%
Intercambios entre clases <i>function</i>	0.17%	0.17%	0.02%	0.00%
Cambio bruto total de las clases <i>feature</i>	1.32%	1.32%	1.23%	0.18%

*Ganancias - pérdidas **Ganancias + Pérdidas ***Cambios que se producen únicamente entre clases del mismo tipo

Un modelo LUCC, en tanto que abstracción de la realidad, se centra en la comprensión y modelización de los principales tipos de cambio. Para el caso de las calibraciones efectuadas, éstos son los cambios desde clases *vacant* a clases *function*. Los cambios que se producen entre clases de una misma categoría (intercambios entre clases *vacant* o intercambios entre clases *function*) no son modelados de manera específica por el modelo. Por tanto, si estos cambios tienen un peso relativo muy grande dentro del conjunto de cambios en la calibración, los índices de validación serán especialmente bajos, en tanto el modelo no es capaz de simular correctamente gran parte de los cambios que ocurren en el área de estudio.

Del total de cambios posibles en la calibración N4, los correspondientes a clases *function*, incluyendo los intercambios entre éstas, poseen un peso muy pequeño (0.65-1.25%) frente al notable peso de las clases *vacant* (2.84-8.06%) (Tabla 10.4). La resolución temática resulta aquí una herramienta indispensable de cara a reducir la complejidad de la calibración para el caso de aquellas dinámicas que no deseamos modelizar. A la hora de calibrar un modelo, debe buscarse la representación del sistema real lo más simple posible, evitando detalle o ruido en aquellos aspectos que no sean de interés para los fenómenos que pretendemos simular (Pontius Jr. y Malanson, 2005).

En nuestro análisis, la calibración N1 es una de las que presenta un mayor Kappa Simulation (Tabla 10.3), debido al elevado índice logrado en la simulación de las clases “arbolado forestal” y “matorral”. La permuta de terreno entre ambas clases (2.02% del total del área de estudio) es así uno de los cambios más importantes que tienen lugar, frente al 1.04% de cambios que representan las clases *function* sobre el total del paisaje. La

correcta modelización de la transición arbolado-matorral tiene un efecto clave en los índices de validación de la simulación realizada. Sin embargo, esta transición dista del objetivo principal de nuestro estudio: evaluar la futura expansión de las áreas urbanas e industriales del Área Central de Asturias. Por consiguiente, si la simulación del intercambio arbolado-matorral no permite explicar mejor las transformaciones rural-artificial de nuestro modelo, la mejor opción es reducir el detalle temático de estas clases, cuyos cambios, por tanto, solo pueden ser considerados como ruido.

La resolución temática de las clases *vacant*, es decir, de las clases origen de una transición de cambio, debe seleccionarse en función de cómo ese desglose de la leyenda permite explicar mejor los cambios que tienen lugar en las clases urbanas (*function*). Si la distinción entre varias clases de origen del cambio no permite explicar mejor el cambio final que tiene lugar, añadir detalle temático para esas clases *vacant* no mejora el poder predictivo del modelo. Al contrario, añade ruido al ejercicio de modelización.

Por tanto, la resolución temática de un modelo LUCC debe estar de acuerdo con el propósito del proceso de modelización y la capacidad que tenemos de explicar los cambios que tienen lugar en la realidad. Como norma general, cabe tener en cuenta que, cuanto mayor sea la resolución temática, mayor es la posibilidad de error y mayor es la incertidumbre, tanto en los mapas de origen (Schmit, Rounsevell y La Jeunesse, 2006) como, en consecuencia, en el ejercicio de modelización realizado.

10.4.3. COMPLEJIDAD DEL PATRÓN SIMULADO

En los modelos de autómatas celulares, en la localización de los cambios juega un papel fundamental la distancia o vecindad de cada clase o cobertura a las distintas coberturas presentes en el mapa. Cuanto menor sea el número de estas coberturas, menos posibilidades tendrá el modelo de localizar los cambios en puntos diferentes. En el caso de la calibración N4, donde solo hay una clase que se modela de manera activa (áreas artificiales), la totalidad del cambio se simula como expansión de esa mencionada clase (Fig. 10.2). El patrón simulado es así mucho más sencillo, en tanto el usuario cuenta con menos herramientas para variarlo.

Tabla 10.5. Autocorrelaciones Moran para los cambios simulados por las clases *function* en cada calibración, sin tener en cuenta los cambios simulados de las clases *vacant*, en cuya localización no interviene el componente de autómatas celulares

Modelo N4	Modelo N3	Modelo N2	Modelo N1
0.312031	0.381907	0.564368	0.592156

Por tanto, a resoluciones temáticas muy bajas, el crecimiento se dispone de forma más compacta y simple, tal y como revelan los índices de correlación de los cambios simulados (Tabla 10.5). No obstante, las mayores demandas en las calibraciones a menores resoluciones (N2 y N1) afectan también al patrón simulado, al contar el modelo en estos casos con una mayor cantidad de píxeles a localizar. Éstos, tal y como se ha explicado con anterioridad, tienden a cubrir la demanda de los mismos procesos de cambio y, por tanto,

a favorecer el cambio en aquellas áreas más propicias. En el caso de ejemplo, éstas se corresponden con la ciudad de Oviedo (Fig. 10.2).

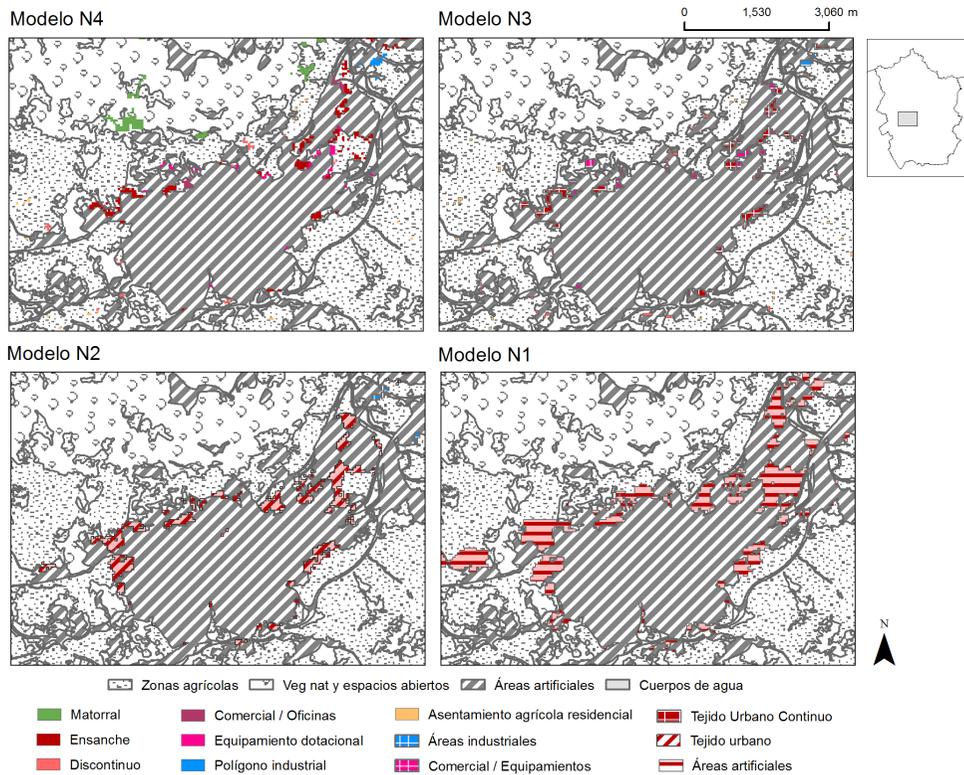


Figura 10.2. Simulaciones obtenidas en cada calibración para un área de ejemplo del ámbito de estudio (ciudad de Oviedo y su entorno). Fuente: SIOSE 2011 (IGN)

10.5. CONCLUSIONES

En este trabajo, se ha demostrado cómo la resolución temática elegida tiene consecuencias en la calibración de un modelo del Cambio de Usos y Coberturas del Suelo (*Land Use Cover Change*, LUCC). Mayores resoluciones temáticas suponen un incremento de la cantidad y complejidad de los tipos de cambios susceptibles de ser simulados. Cuando no se vincula el detalle temático elegido a la complejidad de la calibración o del modelo, éste adolecerá de importantes limitaciones para simular el conjunto de dinámicas o cambios existentes en la base de datos. A su vez, como los índices y métodos de validación comparan los cambios simulados con el total de cambios presentes en el mapa original, si nuestros datos muestran cambios secundarios relevantes, que no son objeto directo de modelización, los resultados de la validación serán limitados, aun cuando el modelo haya simulado correctamente las dinámicas de interés para el objetivo del estudio.

Tanto las demandas como el patrón simulado son también dependientes de la resolución temática escogida. En función del detalle temático, el cálculo de las demandas puede

variar notablemente y, con él, los resultados del modelo. Del mismo modo, la complejidad del patrón simulado dependerá en gran medida de la resolución temática seleccionada.

En conclusión, el usuario debe elegir cuidadosamente la resolución temática de los mapas utilizados para la construcción de un modelo LUCC, en tanto los escenarios generados quedarán notablemente influidos por tal decisión. Si su elección no se encuentra plenamente razonada, la simulación y las conclusiones alcanzadas pueden ver mermada su significatividad.

Chapter 11

Global uncertainty analysis in LUCC modelling through the comparison of four model software packages ¹

11.1. INTRODUCTION

The representation of any of the earth's characteristics or processes through a map or a GIS procedure always means a simplification of the real-world complexity. This is unavoidable, because it is impossible to communicate all the details of the real world.

The difference between how the real world is and how a map or a GIS procedure represents it introduces a source of uncertainty in our knowledge. In this regard, uncertainty can be defined as an indicator of the degree of distrust of the images and concepts of the real world that we are using (Castilla and Hay 2007)². This uncertainty must be carefully examined to be aware about the limitations of our analysis and studies.

Uncertainties, although common in any GIS analysis, are especially relevant in the case of Land Use Cover Change (LUCC) models. They try to replicate the behaviour of a real system. Every one of its components is represented in the model with a different level of uncertainty. The interactions between the model components and their uncertainties cause new sources of uncertainty. Therefore, the final results of the model are determined by large sources of uncertainty, which are difficult to disentangle (Uusitalo et al. 2015). In addition, the assessment and validation of these results are uncertain as well, making all the cumulative effects difficult to understand, especially from an end user perspective.

Knowledge about uncertainty in LUCC modelling is essential to engage planning agents and spread their use in real-world problems solving (Yeh and Li 2006; Batisani and Yarnal 2009; Sohl et al. 2016). However, currently there is still a lack of understanding about the general uncertainty of LUCC models (Yeh and Li 2006), especially because most of the uncertainty studies until this moment have addressed specific issues, without providing a general picture of the problem.

¹ This chapter has been submitted to the journal *Environmental Modelling & Software* and is under review.

García-Álvarez D, Camacho Olmedo MT, Van Delden H, Mas, JF, Paegelow, M. Global uncertainty analysis in LUCC modelling through the comparison of four model software packages. *Environ Model Softw*. Under Review

² Refer to Chapter 5 for the definition of uncertainty and associated terms.

11.1.1. MAIN SOURCES OF UNCERTAINTY IN LUCCM

There are uncountable sources of uncertainty in LUCCM, due to the inherent complexity of this analysis³. Several authors have tried to classify these in different groups (Van Asselt 2000; Walker et al. 2003; Refsgaard et al. 2007, 2013; Matott et al. 2009; Klein Goldewijk and Verburg 2013), mainly differentiating the following wide types of uncertainty:

- Epistemological uncertainty. Refers to the uncertainty that comes from the delimitation and conceptualization of the problem to be modelled. When strictly referring to the uncertainty of the way a problem is conceptualized in a model, several authors talk about “model structure uncertainty”.
- Process variability uncertainty. Regarding the different ways a system can evolve in the future.
- Input uncertainty. Uncertainty that comes from the data used in the model and its ability to represent the earth surface and/or its characteristics.
- Parameter uncertainty. Refers to the uncertainty associated to the values at which the different model parameters are calibrated.
- Model technical uncertainty. The uncertainty arising from the computer implementation of the model, concerning not only the model algorithm, but also the data formats, resolution and other issues. It is therefore connected to the input uncertainty.
- Model operation uncertainty. Arises from the accumulation and interaction of uncertainties propagated through the model.

Altogether, they are also known as model output uncertainty (Refsgaard et al. 2007; Klein Goldewijk and Verburg 2013) or the uncertainty cascade (Refsgaard et al. 2013).

Additional uncertainties arise when using or assessing the model results, like those coming from the communication of the results (Wardekker et al. 2008; Verburg et al. 2013), or from the validation of the model, which is related to the methods used to do this task. In this regard, a perfect model validation is not possible, given the complexity of the systems which a model try to replicate (Van Asselt 2000). Perfect validation, i.e. a perfect match between simulation and model reference, usually increases the risk of model overfitting, avoiding the identification of the processes of the modelled system (Brown et al. 2005).

Several studies have analysed some of the above-mentioned sources of uncertainty. There is a large amount of literature published about the influence of input data in LUCC models (Grinblat et al. 2016), especially regarding the scale or resolution of these data

³ Refer to Chapter 5 for a detailed characterization of the sources of uncertainty in LUCCM.

(Dietzel and Clarke 2004; Conway 2009; García-Álvarez 2018), but also related to the different data formats or architectures and, therefore, connected with the technical uncertainty (Dendoncker et al. 2008; Omrani et al. 2015; Díaz-Pacheco et al. 2018).

Numerous are also the studies about the sensitivity of LUCC models to different parameters, as the type of variables considered, the neighbourhood shape and length in the case of CA based models or the way a stochastic perturbation is included in the model (García et al. 2011; Van Vliet et al. 2013b; Houet et al. 2015; Liao et al. 2016). Also regarding the uncertainty that the modeller knowledge introduces in that parametrization (Confalonieri et al. 2016). Hewitt et al. (2014) propose the participation of experts or agents as a way of dealing with the parameter uncertainty.

The quality of the model parametrization is usually assessed through measures and techniques that introduce uncertainty as well. They usually work for calibration and validation steps, being therefore connected with the uncertainty of the model results assessment. Pontius Jr. and Millones (2011) and Van Vliet et al. (2011) explore the limitations of the Kappa statistics, and propose new methods that outperform them. Paegelow et al. (2014) and Van Vliet et al. (2016) review some of the most common methods and procedures, as well as their uncertainties. In a similar vein, Van Delden et al. (2010) address the main problems or uncertainties that come from the model calibration and validation workflow. In this regard, it is also important to review the literature about methods and approaches for the study and quantification of the uncertainty in LUCC modelling (Crosetto et al. 2000; Versteegen et al. 2012; Houet et al. 2015).

From a technical point of view, there are papers studying the different procedures of change potential and change allocation (Riveira and Maseda 2006; Lin et al. 2011; Pérez-Vega et al. 2012; Camacho Olmedo et al. 2013; Shafizadeh-Moghadam et al. 2015). And in addition there are comparisons of the different model architectures and all their characteristics (Kelly et al. 2013; Mas et al. 2014). More recently, it has become popular to study the difference between raster and vector LUCC models (Chen et al. 2013).

Other analyses have focused on the utility of scenarios as tools to deal with the process of variability uncertainty (Kok and Van Delden 2009; Verburg et al. 2013; Alexander et al. 2015; Maier et al. 2016). Mahmoud et al. (2009) provide a general guide for its construction, whereas Van Delden and Hagen-zanker (2009) study the use of storylines (narratives) as basis for the production of quantitative scenarios

To a lesser extent, research is carried out about epistemological uncertainties in LUCC modelling. They have been partially addressed in general research about guides and issues arising from the LUCC modelling workflow (Jakeman et al. 2006; Van Delden et al. 2011a, b; Kelly et al. 2013; Elsawah et al. 2017) and theoretical papers about the purpose, limitations and constraints of LUCC modelling (Lee 1973; Verburg et al. 2009). However, there are not specific analysis that study these type of uncertainties and that arise the awareness about their importance. Finally, several papers have tried to quantify the propagation of uncertainty in LUCC models (Van Der Kwast et al. 2012; Tayyebi et al. 2014; Ferchichi et al. 2017).

In summary, there are only a few works that address the uncertainty problem from a general and both qualitative and quantitative perspective in LUCC modelling. Within that scope, we have only found one theoretical paper addressing uncertainty issues in CA modelling (Yeh and Li 2006), while papers addressing specific models and applications were lacking.

11.1.2. MODEL COMPARISON AS A USEFUL APPROACH FOR GLOBAL UNCERTAINTY ASSESSMENT IN LUCCM

The comparison of different LUCC model software packages is a common approach for the analysis of the uncertainty that comes from their use (Refsgaard et al. 2007; Uusitalo et al. 2015; Sohl et al. 2016; Paegelow et al. 2018), with numerous studies focusing on different aspects of uncertainty, while none having the perspective of a global uncertainty analysis.

A few papers compared the scenario results produced by different models, without considering the dissimilar model architectures (Alexander et al. 2015; Prestele et al. 2016; Sohl et al. 2016). The observed contradictions were explained mainly by the variety of input data and, therefore, due to the input uncertainty. With a similar focus, some papers address questions regarding model architectures as well (Pontius Jr. et al. 2008; Van Delden et al. 2012).

However, the common approach in the comparison of LUCC models is analysing the performance of the same system implemented under a range of software packages. Some papers carried out this comparison as a validation tool to provide more certainty for the obtained scenarios, without any methodological considerations about the models (Berberoğlu et al. 2016). In the other cases, the analysis tried to provide some insight in the understanding about how models work and the possible uncertainties that they introduce (Pontius Jr. and Malanson 2005; Villa et al. 2007; Kim 2010; Mas et al. 2010, 2011, 2014; Díaz-Pacheco and Hewitt 2014; Li et al. 2014; Aguejdad et al. 2016; Pickard et al. 2017; Camacho Olmedo et al. 2018). Other analyses constrained the comparison to the study of different modelling methods inside the same software (Mozumder et al. 2016; Sakieh et al. 2016). Hence, they studied the internal uncertainty of those models.

None of the above-mentioned research has explicitly considered how every model conveys all sources of uncertainty and how these are managed, which is the gap we aim to fill.

11.1.3. OBJECTIVES AND RESEARCH QUESTIONS

We intend to fill the gap through the comparison of different standard model software packages: CA_Markov, Dinamica EGO, Land Change Modeler and Metronamica. As standard models, knowledge about their limitations and uncertainties helps to widespread their employment. Accordingly, several authors encourage the research on these type of

models. By this means they are better understood, facilitating the adoption of modelling tools by a wide range of users (Triantakonstantis 2012; Hewitt et al. 2014).

Every model treats the same system under different assumptions and perspectives, all with different types and levels of uncertainty. Moreover, they include different approaches to uncertainty management. Accordingly, their comparison provides us a general picture of the uncertainty problem in LUCCM.

The comparison was performed by setting up the same application for the four models, assessing their characteristics as well as the different results obtained. This gives us a general glance of the main uncertainties that LUCCM conveys and how they vary according to the employed tool. A comprehensive analysis of all sources of uncertainty in LUCCM is beyond the scope of the paper. Thus, we just have tried to make an approximation to the problem.

Our intention has been understanding the uncertainty issues regarding LUCCM practise in a holistic way from a user perspective. The user perspective was adopted because they are responsible of LUCCM exercises and the nexus with other agents or people taking part of them. In this regard, they need to fully understand the models and uncertainties that they are working with in order to obtain and communicate solid results.

Through this comparison, we try to answer the following questions, based on those formulated by Pontius Jr. (2011):

1. How does every model manage the uncertainty?
2. Can the user control the model and its uncertainties?
3. Can the user understand the model and its uncertainties?

11.2. MATERIALS AND METHODS

11.2.1. MODELS SOFTWARE

The models in our comparison are briefly described below⁴. A high-level overview of their common features and important dissimilarities is provided in Table 11.1.

CA_Markov (Eastman and Toledano 2018a) is a modelling tool which makes use of several procedures integrated in the GIS TerrSet (previously IDRISI). The quantity of changed pixels is determined by a Markov matrix, whereas the location of those pixels is performed through the combination of a series of suitability layers, a contiguity filter and a multi-objective allocation procedure.

Dinamica EGO (Soares-Filho et al. 2002, 2009; Rodrigues and Soares-Filho 2018) is an environmental modelling platform that includes LUCC modelling methods. Due to the flexibility that it offers, there is a wide variety of ways to set up a LUCC model. As common practise, Markov chains and Weights of Evidence (WoE) are used for the estimation of the quantities and change potential. Change allocation is performed through a

⁴ For a detailed description of every model, refer to Technical Note A.

couple of stochastic cellular automata functions: patcher, which produces new patches, and expander, which simulates the growth as expansion of previous patches.

Land Change Modeler (LCM) (Eastman 2015; Eastman and Toledano 2018b) is a constrained LUCC model which is also integrated in TerrSet. The change potential evaluation is empirically obtained through three possible methods: neural networks, logistic regression and a machine learning algorithm (SimWeight). The change allocation is performed through a multi-objective allocation procedure, whereas the quantity of change is estimated by means of a Markov matrix.

Metronamica (RIKS 2012; Van Delden and Vanhout 2018) is a constrained cellular automata model based on the theory developed by White and Engelen in the 90's (White and Engelen 1993; White et al. 1997). Land use is allocated according to a “competition for the space” principle based on the following inputs: interaction rules between land uses (human behaviour), accessibility, land suitability (environmental conditions) and zoning (planning). Demands can be defined externally or by means of a regional model simulating job and population dynamics.

11.2.2. STUDY AREA AND MATERIALS

The models were calibrated for a test study area in Asturias (Spain)⁵. The Asturias Central Area (Fig. 11.1), as delimited in the *Directrices Regionales de Ordenación del Territorio*, comprises the main urban centres and industrial clusters of the region. Accordingly, the main historic changes are from rural uses to urban and industrial developments, with planning being the major factor of the location of the changes. However, the changes currently taking place are not very numerous, being in many cases one-off events.

Land Use Land Cover (LULC) maps were obtained through a generalization of the SIOSE database for the years 2005 and 2011 (www.siose.es)⁶. This treatment introduced a source of uncertainty in the maps, which must be considered (see Chapter 9). As drivers of change, we have employed road layers extracted from the National Topographic Map, elevation and slope data obtained from a Digital Elevation Model, and planning maps.

11.2.3. CALIBRATION

We have calibrated the four models for the Asturias Central Area for the period 2005-2011 under the same drivers and assumptions explaining the change. Metronamica was used as reference for the selection and creation of these drivers, since it is the model that constrains them the most. These drivers are an accessibility, a physical suitability, a neighbourhood potential and a zoning map. Each driver map is made from the combination of different maps and parameters, which in other models can act as independent drivers.

⁵ For detailed information about the study area, refer to Chapter 2.

⁶ For a description of SIOSE, refer to chapters 7, 8 and 9.

Table 11.1. Comparison of the characteristics of the four compared Lucc models

Uncertainty	Model features	CA_Markov	Dinamica EGO	Land Change Modeler	Metronamica
	<u>Input data</u>				
Input data technical uncertainty	Data format	Raster	Raster	Raster	Raster
	<i>LULC maps</i>				
	Thematic resolution	Up to 255 categories	Up to 255 categories	No limitation	Functions: At least 1 Vacant: At least 1
	Required time steps	2 time points	At least 2 time points	2 time points	At least 1 time point
	<i>Drivers of change</i>				
	Data constraints	8 bits undersigned raster (0-255)	Categorical variables.	Continuous variables	Accessibility drivers constructed from shape files and suitability and zoning from raster files
	<u>Quantity of change</u>				
Quantity of changes uncertainty <i>Section 3.2.1</i>	Transition or categories?	Transition	Transition	Transition	Categories
	Input	Markov areas	Markov areas or probabilities	Markov probabilities	Number of pixels (Local Model)
	Default calculation	Markov Chains*	Markov Chains	Markov Chains	No implemented calculation
	Admits manual edition?	Y	Y	Y	Y
	<u>Change potential evaluation</u>				
Change potential maps production uncertainty <i>Section 3.1</i>	<i>Drivers of change</i>				
	Driving forces typology	No limitations.	No limitations	No limitations	Neighbourhood rules; Suitability; Accessibility and Zoning as default. The user can change them by modifying the transition potential formula.
	Dynamic variables	N	Y	Y	Y
	<i>Default Methods</i>				
	Manual or statistical?	Manual (MCE)	Both	Statistical	Manual
	Methods implemented	N* (MCE recommended)	Weights of Evidence (can be edited) Genetic Algorithm	Neuronal networks SimWeight Logistic Regression	Transition potential formula (can be edited)
	Stochasticity	N*	N*	Y (Sample design)	Y (Random factor)
	Type of maps	Land use potential maps	Transition potential map	Transition potential map	Land use potential maps
<i>Admits external maps?</i>	Y	Y	N	N	

	<u>Allocation of changes</u>				
Allocation of changes uncertainty <i>Sections 3.2.2 and 3.2.3</i>	Simulated categories	All	Destination categories of the transitions	Destination categories of the transitions	Function (actively) and vacant (passively) categories
	Allocation of changes algorithm	Multi-objective allocation mechanism	Stochastic selection algorithm	Multi-objective allocation mechanism	Dynamic modelling ranking approach.
	Stochasticity	N	Y	N	N
Pattern uncertainty <i>Section 3.2.4</i>	Pattern variation	Contiguity filter (5x5 or user defined)	Expander and / or patcher	N	N
	<u>Results and validation</u>				
Validation and outputs management of uncertainty <i>Section 3.3</i>	Validation tools	- *	Cross-Tabulation; Fuzzy Kappa; Landscape metrics and more*	Figure of merit and more*	Cross-tabulation; Link to Map Comparison Kit
	<i>Uncertainty results</i>				
	Scenario probability	N*	Y	N*	Y
	Scenario management	N	Y	N	Y
	Intermediate land use maps	N	Y	Y	Y
	Simulation video	N	Y	Y	Y
	Spatial indicators	N*	User design	N*	Y
Application explanation	N	Through Wizard option	N	N	
*Although it is not strictly part of the model, there are tools inside the software where the model takes part which can be used to this end					

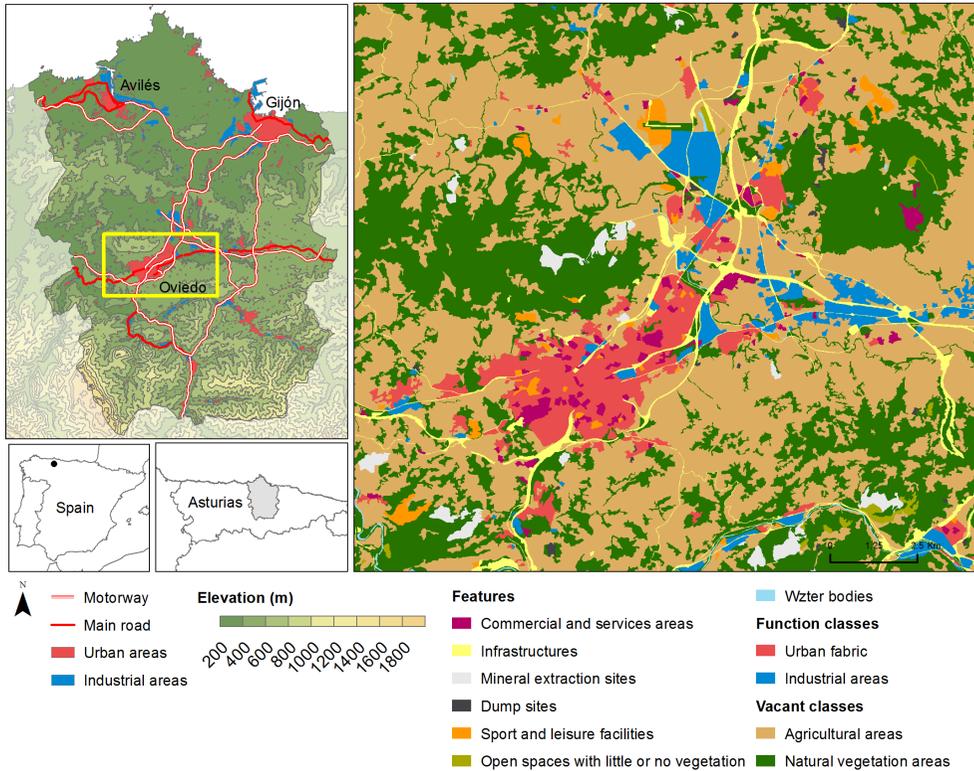


Figure 11.1. Location of the Asturias Central Area (left) and Land Use Land Cover (LULC) map (2011) for an example area (Oviedo and surroundings) (right). Sources: National Topographic Map 1:200.000, DEM25m, SIANE Spanish National Geographic Institute maps, SIOSE 2011 (IGN)

The criteria followed in their creation have been established according to the Metronamica model performance, in the search of the best calibration possible. In this regard, Metronamica allows the user through the model interface to modify the weights and the integration of the input data to create drivers of change (e.g. accessibility). Consequently, the parameters for the driver's creation were decided according to Metronamica model performance in the calibration period. The obtained drivers of change (accessibility, physical suitability and zoning) were next used as input for the other models.

Therefore, the conclusions of the performed comparison are affected by those choices, which unavoidably introduce a source of uncertainty in our analysis. In the same way, when setting up any LUCC model, we come with many decisions that will affect the obtained results. Among the most important, we can mention the thematic or spatial resolution of the model and, regarding the first issue, the categories which will be modelled. The selected spatial resolution was 50m, based on previous experience, the recommendation of the method proposed by Hengl (2006) and conclusions of studies for similar study areas and datasets (Díaz-Pacheco et al. 2018). The thematic resolution has also been selected (Fig. 11.1) according to conclusions of a specific analysis of the thematic resolution effect in a LUCC model for the same dataset and study area (see Chapter 10).

We have tried to summarize the main uncertainties of the models calibration in Figure 11.2. They will affect the conclusions obtained. However, uncertainties in LUCCM are unavoidable.

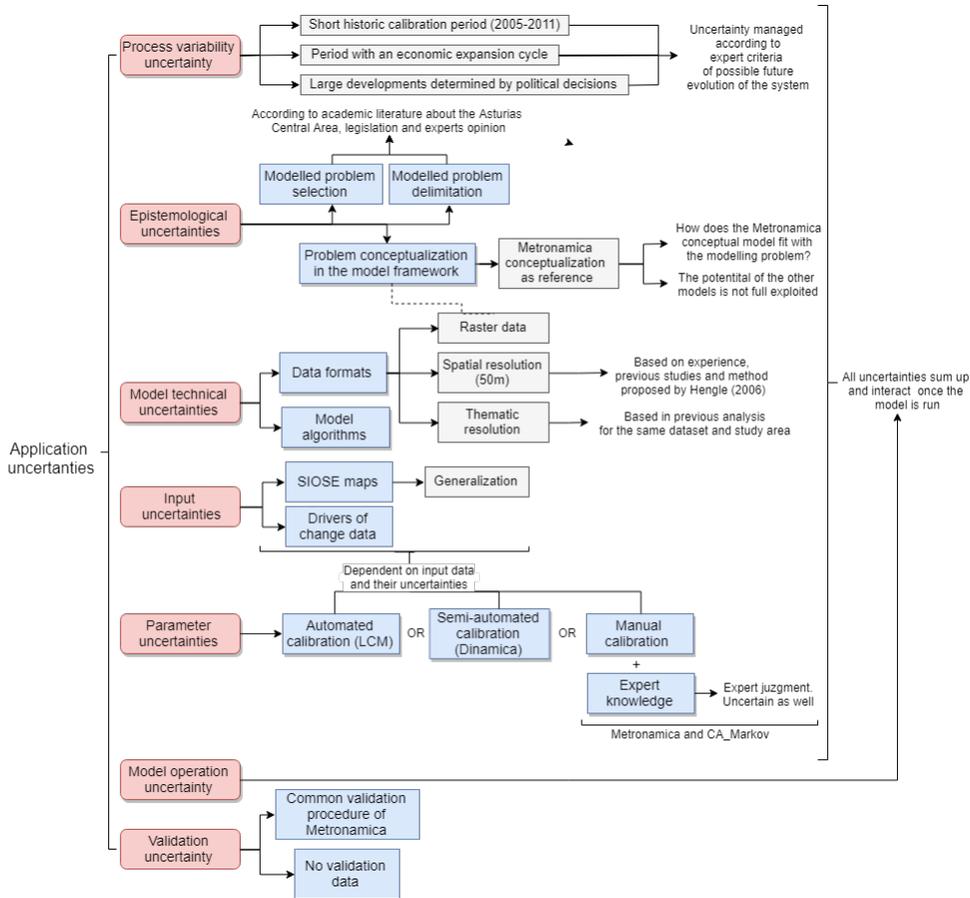


Figure 11.2. Summary of the uncertainties of the performed calibration for the four models that are compared. Boxes with shadows indicate specific sources of uncertainties which are addressed in this chapter

The initial calibration for Metronamica was executed according to the common procedure established for this model (Hewitt et al. 2014; Van Delden and Vanhout 2018). It is a manual calibration, as defined by van Vliet et al. (2016), in which we have also considered knowledge provided by experts in the area. Visual assessment, Fuzzy Kappa⁷ (Hagen 2003), Fuzzy Kappa Simulation (Van Vliet et al. 2013a) and spatial metrics⁸ as number of patches, mean patch size, patch standard deviation and clumpiness (Botequilha Leitao et

⁷ For a detailed description of the Kappa statistics, refer to Technical Note B.

⁸ For a detailed description of the spatial metrics, refer to Technical Note B.

al. 2006) were the chosen tools to assess the model performance. Once a reliable calibration (2005-11) was achieved, the model was run from 2011 to 2020. Quantities of change for the year 2020 were obtained through Markov chains for the calibration period (05-11), although they were modified according to expert criteria.

As we have pointed out, same criteria, quantities and drivers of change, as calibrated for Metronamica, were applied to the other models. However, when some specific parameters were needed (e.g. contiguity filter in CA_Markov or mean, standard deviation and isometry of the new patches in Dinamica EGO) these were properly calibrated over the historic calibration period.

11.2.4. UNCERTAINTY ASSESSMENT

To evaluate the uncertainty of the four models employed, we have first carried out a comparison of the main characteristics of the different software systems, which is partially shown in the section 11.2.1 of this chapter. In parallel, we have analysed and compared the different outputs produced by the models.

To that end, we differentiate between soft-classified maps and hard-classified maps (Camacho Olmedo et al. 2013). The first ones, which we will also refer to as change potential maps, show the probabilities of change to a specific category. On the other hand, the hard-classified maps, which are the final land use maps produced by the models, assign every pixel to a specific category and, therefore, show states instead of probabilities.

Every model was run twice. Consequently, we got two results for every output of each model. Through this pairwise comparison we have been able to assess the internal uncertainty of all outputs in a model. Although more model executions would give a result statistically more meaningful, we have checked that, in practice, there was not much difference between two and ten or twenty executions of the same application. Therefore, as a means of saving time and efforts, we have opted for the first option. Finally, a comparison between the outputs produced by every model has allowed to assess the uncertainties produced by the different model architectures.

Change potential maps for the same model were compared through the Fuzzy Numerical statistic⁹. It compares for a pixel neighbourhood (4x4) the numerical values of two continuous maps and try to see at what extent they are identical (Hagen-zanker 2006). In the calculation, it follows the same logic as the normal Fuzzy Kappa statistic for categorical maps. For change potential maps produced by different models we calculated the Pearson correlation coefficient¹⁰. In these cases, we have only compared those areas where the transitions modelled by the transition potential models could take place, that is, agricultural and natural vegetation areas in 2011, which could become urban fabric or industrial areas in 2020.

⁹ For a detailed description of the Fuzzy Numerical, refer to Technical Note B.

¹⁰ For a detailed description of the Pearson Correlation Coefficient, refer to Technical Note B.

Hard-classified outputs were compared by means of traditional cross-tabulation techniques, Kappa Simulation (Ksim) statistics and spatial metrics provided by the software FRAGSTATS (cumpliness, fractal dimension, largest patch index, patch mean size and standard deviation). Spatial metrics allow to compare the different modelled patterns. Ksim allows to see the agreement between changes of a pair of maps, without considering the persistence (Van Vliet et al. 2011), i.e. the agreement between the changes simulated by every model. Although the Fuzzy Kappa Simulation (Van Vliet et al. 2013a) includes the fuzzy logic in the calculation of the Ksim, we did not account for this metric because it did not show additional information to the one provided by the first statistic.

The metrics of the simulated changes by every model were compared to a benchmark to test the randomness of the results. This was obtained through the Map Comparison Kit and follows the Random Constraint Match approach (Hagen-Zanker and Lajoie 2008), which randomly allocates the quantity of changes introduced as demands in the models.

11.3. RESULTS

11.3.1. SOFT-CLASSIFIED MAPS

11.3.1.1. Different approaches

Two types of change potential maps can be distinguished: Land Use Potential (LUP) maps (CA_Markov, Metronamica) and Transition Potential (TP) maps (Dinamica EGO, LCM) (Camacho Olmedo et al. 2013). The first ones are also referred in the literature as suitability maps (Camacho Olmedo et al. 2013, 2018), although we have avoid here this term because of the confusion that it causes with the physical suitability driver of Metronamica.

LUP maps are built from a set of drivers that explain the possible change for a specific time point. There is a LUP map for every modelled category. Each cell in all the study area indicates the preference of each land use class to occupy that location. In the TP maps, the potential to change is only measured for those areas where the transition can take place (e.g. agricultural areas in the agricultural to urban transition). There is a TP map for every transition modelled. They define the change potential according to the relation between previous changes and the drivers of change. Consequently, the model needs LULC data for at least two different time points.

Models that work with LUP maps are more flexible than models with TP maps. Although transitions can take place from any class to every other class on TP maps, they are usually restricted to the more meaningful. In addition, in LUP maps changes can take place anywhere in the study area and not only within those areas that pertain to the class from which the transition can take place (e.g. agricultural areas in the agricultural to urban

transition). They do not strictly need two time points to be obtained either, although it is usually recommended. Furthermore, for LUP based models it is easier to implement variations in the driving forces of change for the simulation period, as they not purely depend on historic changes, as is usual in the TP models.

Thus, the change potential calculation of TP models usually relates historical changes and driving forces. In a similar vein, LUP maps are usually created based on historical changes. However, whereas the relation between previous changes and drivers of change can be avoided if wanted in the case of LUP maps, that is not always the case of TP maps. Dinamica EGO allows the manual adjustment of the statistical relation found by the model through the WoE method, but LCM does not offer any option to this end.

For areas where the dynamics not follow historical patterns, or where the transitions vary with time, TP restricted models, as LCM, are not really suited. If the input maps contain large sources of uncertainty, they can also find more difficulties to deal with them.

Furthermore, each model put limitations on the number and nature of drivers of change to be considered. Metronamica only comprises four factors of change: neighbourhood interactions, accessibility, suitability and zoning. Notwithstanding, the transition potential formula, which rules the change potential calculation, can be modified to avoid these constrains. In addition, the user can choose how many base maps he or she likes to include in the different drivers. On the other hand, CA_Markov cannot work with dynamic variables.

11.3.1.2. Internal uncertainty

Each model offers the user a range of methods or options to create the change potential maps (Fig. 11.3). Depending on which is chosen, the obtained soft-classified maps can vary to a great extent (Table 11.3). As these decisions come with important uncertainties, they should be reasoned.

LCM offers three methods for transition potential map creation (Fig. 11.3), which, according to Eastman (2015), the model developer, are the ones that offer the strongest capabilities to this end. Moreover, two extra machine learning techniques are in testing for future availability in the model (Eastman and Toledano 2018b). The user can also introduce external TP maps by means of importing them in TerrSet and renaming them with the same name as the output files produced by the model. However, as this is a trick and the option has not been considered by the model developers, hereinafter we will talk just about the three automatic or statistical methods that LCM contains.

Neural Networks and the machine learning algorithm SimWeight produced similar outputs, different from the maps produced through Logistic Regression (Table 11.3). The three methods trust automatic or statistical procedures to find the relation between changes and drivers of change. To this end, they use a sample of pixels as training and then, in the case of Neural Networks and SimWeight, the inferred relations are compared to a set of validation pixels. As far as the analysis sample varies with each model run, the inferred relations change with the sample as well (Table 11.3) (Kim 2010). This introduces

a new source of uncertainty in the analysis. Regarding this point, Kim (2010) talks about the stochastic element that takes part of the TP production in LCM to explain this variation at every model execution.

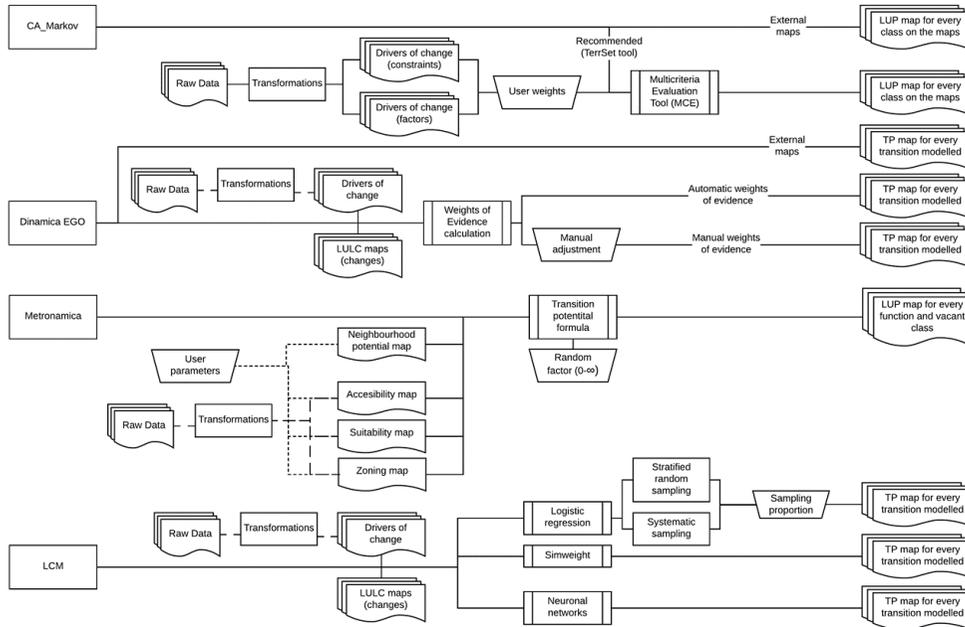


Figure 11.3. Methods for change potential maps production offered by each model according to author's view

The quantity of changes used as reference in the calibration (sample) will affect the significance of the achieved results. For our study area, where only a few changes take place, this uncertainty is especially important, since the selection of one or another pixel as training can end in different conclusions.

Only the logistic regression procedure allows the user to employ all the pixels in the analysis and, therefore, avoid any sample strategy. However, even when using this sample strategy, the results were almost identical at every model run. Thus, in terms of repeatability, logistic regression was the most consistent method for change potential map production for our study area (Table 11.3).

Neural Networks and SimWeight are machine learning techniques, usually described as black boxes (Kim 2010; Mozumder et al. 2016). Despite being easier to use and performing well, the lack of understanding of the relations that the model makes between changes and drivers of changes causes high sources of uncertainty in the modeler understanding of the performed exercise. The user cannot exactly understand which processes have taken place and how they affect the model results.

Dinamica EGO makes use of the Weights of Evidence (WoE), which can be manually edited by the user. They can also opt to use external maps as well. Depending on those

decisions, the obtained maps can differ to a great extent and, consequently, generate totally different scenarios in the end. In our application, as the weights were strongly edited, there are big differences between those TP maps obtained automatically and those which are based on the edited weights (Table 11.3).

Table 11.3. Fuzzy (4x4) numerical statistic values for agreement between outputs of the same model for the category urban fabric (LUP maps) and the transition agricultural areas to urban fabric (TP maps). Both type of maps were obtained for the simulation period 2011-2020. The agreement values are similar to those observed for the other categories and transitions simulated

Land use potential maps				
		CA_Markov (MCE)		
CA_Markov (MCE)		1.00		
		Metronamica		
		Random 0	Random 0.5	Random 1
Metronamica	Random 0	1.000	-	-
	Random 0.5	0.89	0.87	-
	Random 1	0.83	0.83	0.82
Transition potential maps				
		Land Change Modeler		
		Neuronal networks	SimWeight	Logistic Regression
Land Change Modeler	Neuronal networks	0.88	-	-
	SimWeight	0.78	0.90	-
	Logistic Regression	0.58	0.67	0.98-1.00
		Dinamica EGO		
		Manual weights	Automatic Weights	
Dinamica EGO	Manual weights	1.00	-	
	Automatic weights	0.20	1.00	

No stochasticity plays a role in the TP maps creation of Dinamica EGO. Therefore, once the user decides which weights will be used (automatic or edited ones), they keep the same at every model run.

CA_Markov, due to its peculiar nature, lacks a proper method for change potential evaluation, although the model help advises to employ the Multicriteria Evaluation (MCE) tool implemented in TerrSet. The uncertainty of its change potential maps will be related to the chosen method and its specificities. Nevertheless, once the maps are obtained through the selected method, the model does not make any modification to them.

As part of the change potential map creation, Metronamica includes a random factor to give realness to the simulation, since any human process comes with some stochasticity because of the randomness of the human action. Therefore, this stochastic component tries to account for the uncertainty of the real world. The higher the importance of the random factor, the more relevant the differences between two LUP maps obtained consecutively (Table 11.3). As this will affect the way the user understands how the results are affected by slight changes in some parameters or drivers of change, we can consider it a source of uncertainty in the model calibration. However, this stochasticity is controlled by the user, who can decide to run the model as deterministic (random factor of 0) or even specify a predefined random seed, a feature incorporated for testing purposes.

11.3.1.3. Model comparison

Each model follows a different procedure for change potential map creation (Table 11.4). That is why, even when using the same drivers of change, there are important differences between change potential maps (Table 11.5).

Table 11.4. Different components of each model, indicating in which stage of the modelling process they play a role: change potential calculation (light grey) or allocation of changes (dark grey)

	CA_Markov	Dinamica EGO	LCM	Metronamica
General drivers of change	X	X	X	X
Cellular Automata	Contiguity filter	Expander and patcher functions		Neighbourhood potential map
Stochasticity		X		X
Zoning	X	X	X	X

Table 11.5. Regression coefficients between maps for the change potential to the category urban fabric. Only those areas where the transitions can take place (agricultural areas and natural vegetation) are considered in the analysis. The correlation values are similar to those observed for the other categories and transitions simulated

		Land Change Modeler			Dinamica EGO		CA Markov
		Neuronal networks	Sim Weight	Logistic Regression	Manual weights	Automatic Weights	
CA_Markov		0.42	0.46	0.40 - 0.41	0.77	0.62	-
Metronamica	Random 0	0.44	0.42	0.54 - 0.57	0.55	0.51	0.79
	Random 0.5	0.43	0.41	0.53 - 0.55	0.53	0.49	0.76
	Random 1	0.38	0.37	0.48 - 0.50	0.48	0.44	0.68
Dinamica EGO	Manual weights	0.31	0.31	0.24 - 0.24	-	-	-
	Automatic Weights	0.44	0.50	0.39 - 0.40	-	-	-

Metronamica obtains the change potential map through the combination of an accessibility, physical suitability, zoning and a neighbourhood map (CA component) plus a stochastic component that randomly alters the change potential values obtained through the combination of the previous maps. By default, MCE does not have such random factor and for CA_Markov the CA component is applied in the allocation of changes step through a contiguity filter. As consequence, although change potential maps of CA_Markov and Metronamica are similar, they still have important differences (Table 11.5).

Both the CA and stochastic components are applied in Dinamica EGO during the allocation of changes step. However, the main difference here is caused by the manual edition of the WoE. This was made based on process understanding by the modeller according to the parameters decided for the Metronamica calibration, which include user and expert knowledge.

Change potential maps obtained from edited weights show low agreement with those obtained from automatic or statistical procedures in LCM, whereas the agreement is higher with the change potential maps obtained by user knowledge. Maps obtained from weights automatically calculated show high agreement with both types of maps. Hence,

automatically calculated weights are more consistent with the other change potential maps than manual edited ones.

Change potential maps from LCM show similar agreement with maps of all models, except those obtained from manual edited weights in Dinamica EGO. LCM does not include a CA component as part of the change potential calculation. Neither the zoning map, which is applied in the allocation of changes as a multiplier of the change potential map. To replicate the CA behaviour, we have introduced a dynamic variable of distance to the modelled category. It finds a relation between LULC change and the distance to the modelled category, as the CA does in the other models. Both differences, the dynamic variable and the lacking zoning map, explain the differences between LCM change potential maps and those obtained by the other models.

11.3.2. HARD-CLASSIFIED MAPS

11.3.2.1. Quantity differences

Different approaches for quantity of changes estimation can be pointed out for the four models (Table 11.1). CA_Markov, Dinamica EGO and LCM work with Markov chains. This method produces a probability matrix of change that indicates the probability of every category to change to every other class and to keep the same. Afterwards, a transition area matrix is obtained that translates those probabilities in actual number of pixels.

Markov chain probabilities depend on the previous state of the same cell (Benenson and Torrens 2004; Berberoglu et al. 2016), as they are obtained from the comparison of LULC changes at two different time points. Dinamica EGO and LCM can automatically calculate this matrix, whereas CA_Markov does it through the tool included in the GIS TerrSet.

In Markov chains, quantities of change are indicated in the form of transitions, that is, the area or probability to change from one category to the other. Therefore, there are the same problems and limitations as pointed out for TP models. It is difficult to model systems where the land use dynamics change frequently and that not follow historical patterns of growth (Mas et al. 2018; Paegelow 2018).

When obtained from cross tabulation of input maps, uncertainty in these maps also plays an important role in the change probabilities of Markov models. Probabilities to change are obtained from measured changes in input maps. If these are uncertain, the obtained probabilities will be uncertain as well. The TerrSet tool for Markov chain calculation allows the user to consider the uncertainty of the input maps in the quantity of change estimation. However, this introduces important modifications in the calculated quantities of change, overestimating them (Mas et al. 2014). Therefore, this method can introduce more uncertainty than the one for which it finds an answer.

Nevertheless, the three models allow the user to manually modify the obtained Markov probabilities, avoiding the input data uncertainties if wanted. Whereas in CA_Markov and Dinamica EGO the user can modify the transition area matrix, in LCM he can

only vary the transition probability matrix. As an approximation of the real changes in pixels, this resulted in a substantial difference of the demands of this model for the performed comparison (Table 11.6).

Table 11.6. Changes in pixels simulated by every model (2011-2020) for every class and transition

Modelled transitions	Urban fabric			Industrial areas		Agricultural areas	
	Agricultural areas to...	Natural veg. areas to...	Industrial areas to...	Agricultural areas to...	Natural veg. areas to...	Urban fabric to...	Industrial areas to...
Reference	965	116	0	294	88	0	0
CA_Markov	963	117	0	297	90	0	0
Dinamica EGO (Manual)	964	115	0	293	88	0	0
LCM (Neuronal)	972	117	0	297	90	0	0
Metronamica (0.5)	928	185	12	346	50	44	2
Modelled covers	Urban fabric			Industrial areas		Agricultural areas	
Reference	1081			382		0	
CA_Markov	1080			387		0	
Dinamica EGO (Manual)	1079			381		0	
LCM (Neuronal)	1089			387		0	
Metronamica (0.5)	1125			396		46	

The quantities simulated by CA_Markov and Dinamica EGO are also different to those ones indicated in the transition area matrix. Nevertheless, these differences are not remarkable (Table 11.6). They are caused by splitting the initial demands in several functions (expander and patcher) and time steps in Dinamica EGO, and because of the time steps and contiguity filter in CA_Markov (Camacho Olmedo et al. 2015).

In Metronamica the user enters the total number of pixels (persistence + changes) that will make up each function class. The transitions and the cluster size modelled for every category will rely on the settings of the interaction rules in the CA component. Through this step, the user calibrates values for conversion and attraction of the land use to itself, determining the final modelled quantities. Therefore, the quality of the calibration plays a crucial role in the quantities of change.

Metronamica is the most flexible model for modelling different types and speeds of change. However, because of this high level of flexibility, the ability of the user to replicate the dynamics of change is critical when calibrating the model. If the user does not introduce high values of inertia for the existent pixels of the function classes, some incongruent transitions, like urban to agricultural, can take place. Consequently, as in our case, could simulate more pixels of the function classes than expected (Table 11.6). Moreover, since the user cannot enter any information about the quantities of the vacant classes, their final size will also rely on the user calibration.

11.3.2.2. Allocation algorithms

LCM, CA_Markov and Metronamica follow a deterministic procedure for change or land use allocation. LCM and CA_Markov make use of a Multi Objective Land Allocation (MOLA) mechanism. It is applied at every iteration (CA_Markov) or recalculation stage (LCM), i.e. time steps, specified by the user. It selects those pixels with the highest potential to change, solving conflicts between different objectives based on the minimum-distance-to-ideal-point-rule (Eastman et al. 1995).

Metronamica follows a similar procedure. It selects the pixels with the highest potential to change for every category, allocating first the demands of the function classes and, then, the pixels of the vacant classes. Although the process is deterministic, the random factor added to the change potential maps allows less likely changes to take place.

Whereas in Metronamica the winner class, that is, the one that has the highest potential value for a specific pixel, will take that pixel, in the other two models an equilibrium is achieved between all classes and the pixels with the highest potential values for every of them. Accordingly, when there is a conflict between classes for the same location, the pixel might not be assigned to the class with the highest potential value.

Opposite to the previous mechanisms, stochasticity can play an important role in most of the steps of the allocation process in Dinamica EGO¹¹. This stochastic component will be more or less meaningful depending on the application and its parameters. If, as in our study case, stochasticity plays a key role, the final selected pixels can be difficult to understand. Therefore, uncertainties can arise when the user calibrates the model and tries to find out how every parameter affects the results.

Dinamica EGO firstly selects the pixels with the highest potential to change. The quantity of selected pixels is determined by the pixel demands and a prune factor that acts as multiplier. Accordingly, the default prune factor (10) selects ten times the quantity of pixels needed to change. Depending on the selected prune factor, more or less stochasticity can be added to the simulation.

Then, between all these pixels, the model selects randomly one pixel and compares its potential value with a random threshold. Accordingly, the model follows a Monte Carlo method that compares the transition probability of each cell with a random number (García et al. 2011). If the cell value exceeds that threshold, the pixel will change. Otherwise, another pixel is selected and the process repeated. The higher the potential value of a pixel, the more likely it changes.

Once a pixel is selected, it turns into a seed pixel to simulate a new patch according to the expander and patcher functions philosophy. The first function allocates new changes as expansion of previous patches, whereas the patcher function allocates new changes as a new patch. The user parameterizes these functions through three values: mean, variance and isometry of the simulated patches. The first two values, together with

¹¹ For a graphic description of the allocation of changes mechanism of Dinamica EGO, refer to Technical Note A.

a random component, are used to decide the number of pixels that will compose every new patch originated from the initial seed pixel. Afterwards, pixels in a neighbourhood window (3x3 by default, though it can be user defined) of the seed pixel will be selected following the threshold mechanism explained above until the number of pixels that compose that patch is reached.

As a random factor plays a role when deciding the number of pixels that compose the simulated patch, the results can be different at every model run. The bigger the mean and variance values, the more different the sizes of the new patches between two consecutive model executions. However, if the mean size is the same as the pixel size and there is not standard deviation, this stochasticity can be avoided.

When a patch is composed of more than one pixel (mean and standard deviation parameters different from the pixel size), the pixels that expand the patch from the initial seed pixel do not have to pertain to the initial quantity of selected pixels (demands*prune factor). Therefore, if the initial pixel selected as a seed pixel is different at every run of the model, because of the considered random threshold, the selected pixels can be quite different at every model run too.

Summarizing, there are several sources of stochasticity in Dinamica EGO, which go further than the prune factor. Accordingly, this is just able to manage part of the stochasticity of the model. To avoid the stochasticity of the threshold criteria applied when selecting one pixel, clear and different transition potential values for candidate cells are needed. Moreover, by parameterizing the expander and patcher functions according to the pixel size, their stochasticity is avoided.

For our application, the patcher and expander functions were parameterized with values different to the ones corresponding to the pixel size. In addition, potential values for the most suitable areas to change are similar. Consequently, despite of having chosen a prune factor of 1, the model produced very different results at every run: for two consecutive simulations almost 80% of the allocated changes were in different positions (Table 11.7).

Major agreement can be achieved by choosing a prune factor below 1, although in these cases the model can fail when trying to comply with the user demands. The prune factor diminishes the number of seed cells and, therefore, if there are no suitable cells (high potential) around the selected seed cells, the demands will not be completely met.

11.3.2.3. Allocation difference

Of all four models, Dinamica EGO shows the most disagreement with the other simulation results (Table 11.7), due to the important differences in the change potential maps, when using manual edited weights, but also because of the stochasticity in the allocation of changes algorithm. On the other hand, the highest agreement was found between CA_Markov and Metronamica, both based on manual calibration and LUP maps. They both also share a common CA logic.

There is not any agreement between the results of all four models and the benchmark (Random Constraint Match model) (Table 11.7). Although the comparison is just provided here between the four model simulations and one random map, similar results were achieved for the comparison between all four simulations and several different random maps. Therefore, in absence of a validation map, it demonstrates that the obtained results by the four models, as their agreement, are not just random.

Table 11.7. Kappa Simulation scores between pair scenarios of the studied models at the class level. Each pair of scenarios was compared to the initial landscape map (2011) to only account for the simulated changes agreement

Urban fabric				
	CA_Markov	Dinamica EGO (Manual)	LCM (Neuronal networks)	Metronamica (0.5)
CA_Markov	1	-	-	-
Dinamica EGO (Manual)	0.25	0.22	-	-
LCM (Neuronal networks)	0.56	0.16	1	-
Metronamica (0.5)	0.76	0.24	0.53	1
Benchmark	0.00	0.00	0.00	0.00
Industrial áreas				
	CA_Markov	Dinamica EGO (Manual)	LCM (Neuronal networks)	Metronamica (0.5)
CA_Markov	1	-	-	-
Dinamica EGO (Manual)	0.24	0.32	-	-
LCM (Neuronal networks)	0.51	0.16	1	-
Metronamica (0.5)	0.69	0.23	0.40	1
Benchmark	0.00	0.00	0.00	0.00

At the class level, the agreement between models is always higher for the urban fabric cover than for the industrial areas one (Table 11.7). Two reasons explain this behaviour: the larger size of the first class and its simpler pattern of growth. Usually, the larger the size of a class at the same data detail level, the greater the probability to represent the changes that take place. In addition, the growing pattern of urban fabric, as expansion of previous patches, is easier to replicate and it fits better with the models' logic. Opposite, in the case of industrial areas, the changes do not only take place as expansion of previous patches.

The higher agreement between models for the urban fabric class reveals the better prediction of this class, since there is less uncertainty when computing its growth from different methods. That is, the result is more consistent. In this way, models comparison can be seen as a tool to assess the uncertainty that the modelled processes convey (Pérez-Vega et al. 2012; Sohl et al. 2016; Paegelow et al. 2018).

11.3.2.4. Pattern difference

CA_Markov, Dinamica EGO and Metronamica include a Cellular Automata component to replicate the real LUCC pattern. This is lacking in LCM, which however allows to include a dynamic factor of distance to any of the map categories. Accordingly, the model can infer from this variable the relation between LULC changes and the distance to pixels

of the other categories. This information allows LCM to model a similar pattern to the one simulated by CA models in the case of study areas characterized by simple growing patterns, as ours (Figure 11.4). Nevertheless, the final established relation will always rely on the inferences made from the change potential calculation method and the uncertainties that it contains.

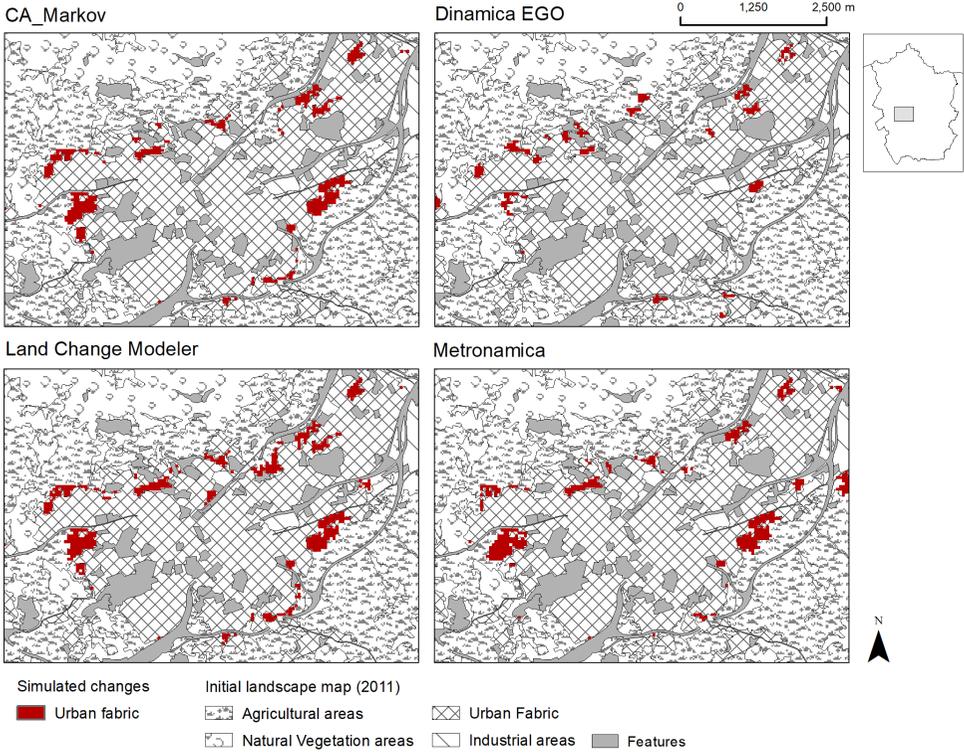


Figure 11.4. Changes simulated by every model for an example of the study area (Oviedo)

A map of constrains and incentives also plays an important role in LCM: it acts as multiplier of the change potential map, in a similar way as the zoning driving force works in Metronamica. If planning plays an important role in the system under study, LCM is therefore able to simulate a real pattern, since this will be greatly controlled by the planning rules. However, the more important this factor is in the model, the more deterministic the model results will be and, therefore, the less sense it will make to carry out the modelling exercise.

CA_Markov and Metronamica show a similar pattern of changes, especially in the case of urban fabric (Table 11.8 and Figure 11.4). However, according to spatial metrics for the whole study area (Table 11.9), Metronamica shows more similarity with the initial landscape than CA_Markov, which simulates a more aggregated landscape: the number

of patches is always much lower than in the reference map and in Metronamica. Moreover, the area mean and standard deviation are larger (Table 11.9).

Table 11.8. Spatial metrics of the changes (without persistence) simulated by every model, compared to the benchmark (random model). NP: Number of patches; LPI: Largest patch index; Mean; Patch mean size; SD: Patch standard deviation; FRAC_MN: mean fractal dimension

	NP	LPI	MEAN	SD	FRAC_MN
Urban fabric					
Benchmark	1066	0.0002	0.25	0.03	1.00
CA_Markov	151	0.009	1.79	2.85	1.04
Dinamica EGO	123	0.0029	2.20	1.36	1.06
LCM (Neuronal networks)	110	0.0105	2.50	4.51	1.04
Metronamica	153	0.0091	1.84	3.06	1.04
Industrial or commercial areas					
Benchmark	381	0.0001	0.25	0	1.00
CA_Markov	84	0.0088	1.15	2.48	1.03
Dinamica	70	0.0025	1.36	1.43	1.05
Land Change Modeler (Neuronal networks)	55	0.009	1.76	3.55	1.04
Metronamica	94	0.0047	1.05	1.61	1.04

Table 11.9. Spatial metrics of the simulation produced by the four models, compared to the benchmark (random model) and to the initial map (2011). NP: Number of patches; LPI: Largest patch index; Mean; Patch mean size; SD: Patch standard deviation; FRAC_MN: mean fractal dimension; CLUMPY: cumpliness

	NP	LPI	MEAN	SD	FRAC_MN	CLUMPY
Urban fabric						
Land use map 2011	358	0.7006	16.58	104.11	1.0787	0.8042
Benchmark	1415	0.7007	0.01	0.0211	1.0857	0.7680
CA_Markov	351	0.7081	17.68	109.67	1.0773	0.8168
Dinamica EGO	350	0.7273	17.73	110.01	1.0786	0.8116
LCM (Neuronal networks)	365	0.7039	17.10	107.02	1.0779	0.8071
Metronamica	362	0.7127	17.14	108.89	1.0765	0.8132
Industrial or commercial areas						
Land use map 2011	277	0.3196	12.55	54.65	1.0638	0.8198
Benchmark	661	0.3196	0.0022	0.0144	1.1143	0.7972
CA_Markov	269	0.3274	13.28	58.11	1.0638	0.8275
Dinamica	273	0.3357	13.08	57.58	1.0642	0.8211
Land Change Modeler (Neuronal networks)	277	0.3275	12.89	57.52	1.0633	0.8218
Metronamica	278	0.3286	12.85	57.14	1.0626	0.8226

In CA_Markov the user can vary the simulated pattern through a user-defined contiguity filter, which applies the same compactness logic to all modelled classes. This up-weights the land use potential values of pixels close to pixels of the considered class and down-weights those which are far from this (Camacho Olmedo and Mas 2018). Meanwhile, Metronamica allows to define neighbourhood interactions between all classes of the map and each function class, making it possible to get more complex patterns. The user can also play with the random factor to facilitate the production of new patches, although this is not always very effective (Hewitt and Díaz-Pacheco 2017).

When not making use of all that complexity, as in our case, results from Metronamica can be similar to the ones obtained by simpler models as CA_Markov (Fig. 11.4). We

defined simple contiguity rules, which therefore produced a similar result to the contiguity filter of CA_Markov. Nevertheless, spatial metrics show a few differences between the two models, which demonstrates the simpler pattern simulated by CA_Markov (Table 11.9).

The pattern simulated by Dinamica EGO is the most different from the compared simulations (Figure 11.4), being consistent with the patcher and expander function parameters (mean, variance and isometry). As far as the user can vary these parameters as desired and he can also split the changes between expansion and generation of new patches as wanted, Dinamica EGO offers a lot of flexibility to vary the modelled pattern. This ability has also been demonstrated by Soares-Filho et al. (2003) and Mas et al (2014), although some limitations depending on the minimum mapping unit of the input data has been pointed out in the Chapter 9 of this thesis.

Whereas CA_Markov and Dinamica EGO offer specific tools to get the desired pattern in the allocation of changes step, this has to be achieved by means of model calibration in the other cases. Notwithstanding, the user can also calibrate the former two models differently to get another pattern different from the simulated.

The fractal dimension index and the clumpliness, which inform us about the complexity of the simulated patches, show how CA_Markov always obtains the simplest pattern (Tables 11.8 and 11.9). For CA based models, pattern complexity has usually been analysed according to the ability of the model to simulate emergent growth isolated from previous developments, i.e. according to the ability of the model to simulate dispersed growth (García et al. 2011; Hewitt and Díaz-Pacheco 2017). Only Dinamica EGO allows the user to manage that complexity directly, whereas Metronamica deals with it through the random factor. CA_Markov and LCM do not allow for user interference. Notwithstanding, in the case of CA_Markov, the user can link two consecutive models, one with a contiguity filter (as expansion of previous patches) and another one without that filter, replicating the patcher function of Dinamica EGO.

Finally, spatial metrics also show how the changes and landscape simulated for the four models is very different from the random model, which is less consistent with the initial landscape (Tables 11.8 and 11.9). This demonstrates that the four model outperform the random model.

11.3.3. VALIDATION AND OUTPUTS

Metronamica, through the complementary Map Comparison Kit software, and Dinamica EGO, allow to calculate a wide range of measures, from quantity to allocation and pattern (dis)agreement. LCM just includes the Figure of Merit although, as CA_Markov, the TerrSet GIS where they are included also provide almost all type of the essential metrics needed to make a complete LUCC model calibration and validation.

Metronamica is the only model that explicitly includes a tool for scenario management, and also the only one that provides output in the form of class probabilities in

addition to final class states. Dinamica EGO, because of its flexibility, can be designed to produce similar results. However, these are not possible in the TerrSet models. They are not able to deal with the uncertainty that comes from process variability. Neither are they able to communicate the uncertainty that comes from the stochasticity of the prediction since, apart from the sample selection in the change potential evaluation for LCM, they do not include any stochasticity in the modelling process.

11.4. DISCUSSION

The performed comparison has allowed us to see different approaches to LUCCM and some of the uncertainties that the selection of one conveys. Hereinafter, based on those results, we try to make a general analysis about sources and management of uncertainty in LUCCM. To this end, we will answer the three proposed research questions. Previously, we make a brief discussion about the way this study has been performed and its drawbacks.

11.4.1. REFLECTION ON THE PERFORMED ANALYSIS

As described in the materials and methods section, the way this analysis has been performed has surely affected the achieved conclusions. Considering its implications in interpreting the results is therefore important.

The adoption of Metronamica as the reference model for the calibration of all four models is one of the main limitations of our analysis. As it is the model that constrains the considered driving forces the most and one that gives big importance to user criteria when creating them, we did not take advantage of the full potential of the other three models. Accordingly, for these models, shortcomings in modelling the studied system can be attributed to this source of uncertainty. Similar studies adopting other models unlike Metronamica as reference are therefore required to complete the conclusions here obtained.

The special characteristics of our study area have also greatly influenced this analysis. There is just temporal consistent data for two time points in recent years, which impede the validation of the simulations and, consequently, detecting part of the uncertainties of the modelling process. Accordingly, we were not able to compare some of the calculated statistics, as the Kappa Simulation or the spatial metrics, to the ones obtained using a reference map for the simulation year. In addition, the dynamics of the study area are scarce, being especially important the presence of one-off events due to the short calibration period (6 years). This makes it difficult for statistical or automatic procedures to infer the processes of change, and emphasizes the use of expert judgment. Planning plays a key role in the observed allocation of changes. Models which give more importance to this variable are consequently more able to properly model this study area. Other factors as, for example, the pattern characteristics, impact the analysis results. Only by applying

the same analysis to a wide range of areas, with different characteristics and limitations, these uncertainties could be partially avoided.

Finally, other decisions, as the spatial or thematic resolution, have had consequences as well. Between the technical decisions of the comparison, the way the internal uncertainty for a model has been analysed can be referred as uncertain. We have just run every model twice. Although this is not statistically meaningful, our experience for part of the models has showed very similar results to the ones achieved by running the same model more than 20 times. Therefore, given the temporal and technical constraints, we have opted for the first option.

11.4.2. HOW DOES EACH MODEL MANAGE THE UNCERTAINTY?

How a system is conceptualized in a model comes with one important source of epistemological uncertainty. The technical uncertainty that comes when writing the algorithm for that conceptualized model is also part of this.

CA_Markov, Dinamica EGO and Metronamica, although from different ways, approach the phenomena from the same CA based common theory. That is, a complex system's behaviour can be explained by the relation between every of its components (pixels) and their neighbourhoods. LCM relies on machine learning and statistical procedures to replicate the studied phenomena. These just study the relation between past changes and drivers of change and apply it to the future.

For our study area, changes are usually located next to previous pixels of the same category. Despite not relying on CA theory, LCM machine learning methods have inferred well this relation, mainly from the dynamic driver of distance to the modelled category. Therefore, regardless of the different approaches, results have been similar on the subject of the general theory in which changes take place. Nevertheless, this may not be true for all systems and dynamics and, therefore, a reasoned decision should be made before choosing one or another approach.

Going in more depth, important differences can be pointed out when analysing the epistemological and technical uncertainty that arises from the conceptualization of the systems and its computer implementation.

CA_Markov, Dinamica EGO and Metronamica implement the CA theory in a different way. It goes from the simple contiguity filter applied in CA_Markov (Camacho Olmedo and Mas 2018), the patcher and expander functions of Dinamica EGO (Mas and Rodrigues 2018) to the complex definition of cell interactions that can be defined in Metronamica. When comparing the simulation results across the four models, Dinamica EGO provided results that were the most discernible from the others. On the other hand, CA_Markov and Metronamica provided very similar results, despite of the simpler CA logic that is included in the first model. The simple patterns of growth of our study area do not require the full complexity offered by Metronamica and, therefore, the calibrated

interactions of Metronamica do not differ to a great extent from the effect of the contiguity filter applied by CA_Markov, being the result showed by both models quite similar.

LCM is a very constrained model that does not allow the user to modify many of the parameters which rule the model performance. If the LCM change potential evaluation methods are not able to infer the patterns and processes of change, the user does not have the ability to improve the model's behaviour. In the other models, when the default methods cannot infer those relations, the user can introduce the proper knowledge to get the desired output. This has been important for our study area, given the short calibration period and the existence of significant one-off events.

When choosing LCM, proper calibration periods should be used, paying special attention to the uncertainty of input data. The calibration period must contain enough quantity of changes as to be able to infer from these the pattern to simulate. Those changes should be also representative of the future developments in the area. In this regard, short calibration periods may be misleading, as can be affected by temporal processes of change and numerous one-off events.

Zoning played a key role in the changes of our study area. Whereas in CA_Markov and Dinamica EGO planning was treated as just another variable, it has an important and determinant role in LCM and Metronamica. Accordingly, for cases where zoning is a major driver of change, these models can be a good option. Nevertheless, both CA_Markov and Dinamica EGO can be parametrized in a similar way to the other two models.

Stochasticity is considered as an important feature by several authors to replicate real phenomena (García et al. 2011; Van Vliet et al. 2012; Renard et al. 2013). It accounts for the uncertainty of the real world, where decisions are dependent on uncertain human actions. At the local level, this means unusual human behaviours that result in different changes to the expected. At the regional or global levels, the aggregation of these different behaviours brings about new drivers or processes of change, which finally change the foundations of the systems. Thus, real systems are far from equilibrium systems, as they can evolve to new stages governed by new rules and processes (White et al. 2015).

Stochasticity facilitates those tipping points to happen, allowing to replicate more complex systems. However, changing the foundations of a system is in the reviewed models only possible by means of entering a large randomness, which at the same time introduces great uncertainties in the user comprehension of the model. It is also very difficult in applications for areas like the one analysed here. Planning is a key factor of the changes that take place and, therefore, only by large randomness very different changes can happen in the simulation.

In this regard, stochasticity can be seen as a way to communicate the uncertainty of change allocation in areas where there are several spaces with high potential to change, but where just a few changes finally take place. In these cases, uncertain human behaviour can play a decisive role. For addressing the changes in the foundations of the systems, scenarios are a useful tool (Van Asselt 2000; Maier et al. 2016), as they give a range of

possible systems evolutions, under different drivers and processes of change. Nevertheless, caution should be paid regarding the uncertainty they capture, as studies show that there are often larger differences between results of a baseline scenario simulated with different model software packages than between different scenarios run with the same model (Van Delden et al. 2012; Prestele et al. 2016; Sohl et al. 2016).

The advantage of exploring uncertainties through the scenarios approach is that it is very transparent to the user what is being tested. The disadvantage is that only those uncertainties that can be thought of will be included, while a more black box approach also captures the unknown unknowns. However, the last is done in a very simple way and without any understanding of what these would be.

Neither CA_Markov nor LCM include enough stochasticity as to account for the process variability uncertainty. Markov chains, as probabilities of change, allow considering the stochasticity of the quantities of change. Sample design based methods for change potential analysis, as the Neuronal Networks in LCM, are also considered stochastic (Kim 2010), because of the internal uncertainty that these methods convey, as shown in our analysis. However, through none of both ways can the user introduce the stochasticity needed as to really account for the uncertainty of the human action.

In addition, LCM is just able to model business-as-usual scenarios (Eastman and Toledano 2018b), not allowing to deal with process variability uncertainty through the management of scenarios. In this regard, it provides few chances for parameter variation (Pérez-Vega et al. 2012). This approach, according to Van Asselt (2000), removes the efficiency and utility of scenarios as a tool to deal with the described type of uncertainty. It goes also against one of the considered modelling objectives: design possible lines of development, more than forecast real developments (Camacho Olmedo et al. 2018). On the other hand, CA_Markov, as Dinamica EGO and Metronamica, allows developing scenarios through running consecutive simulations, each one with different parameters according to the considered storylines.

Metronamica includes a stochastic perturbation as part of the change potential evaluation and Dinamica EGO, in addition to the Markov chains, makes use of a stochastic allocation of changes algorithm. The Metronamica stochastic perturbation allow less likely changes to happen and has been pointed out as useful when communicating the uncertainty of the change allocation step (White et al. 2015). However, Hewitt and Díaz-Pacheco (2017) state that, for their application, the Metronamica stochastic perturbation component has showed low effectiveness when trying to simulate complex patterns of change. In addition, Wu (2002) and García et al. (2011) have pointed out the limited stochasticity that the stochastic perturbation approach introduces in the models, although they have not considered the Metronamica case specifically.

Models based on a Monte Carlo method that compares the transition probability for each cell with a random number (García et al. 2011), as Dinamica EGO, can produce very stochastic simulations. As in our application, the model can show very different

results every time that it is run (García et al. 2011; Kim 2013). This gives an answer to the system evolution and the human behaviour uncertainties previously referred. However, according to van Schroyen Lantman et al (2011), that is also sign of an unsteady and useless model for LUCC simulation and it is contrary to the need of transparent, simple and robust models stated by Lee (1973). In this regard, the uncertainty that this method introduces in the user comprehension of the performed calibration can be higher than the one for which it finds an answer, related to the uncertain system dynamics. Accordingly, special attention must be paid to the degree of stochasticity that the modelling exercise with these models, as Dinamica EGO, conveys. If is too large, the modeller should calibrate the model in a way that the impact of the stochastic component is reduced.

Despite these issues regarding the stochasticity of both models, Dinamica EGO as well as Metronamica allow for the management and creation of different scenarios, accounting for exploring uncertainties regarding future developments..

The type of change potential map used (land use vs transition potential) also affects the way the LULC dynamics can be modelled. Land use potential maps are more flexible, since they allow any type of change to happen. Markov matrix and transition potential maps, if not manually edited, reproduce past processes into the future (Camacho Olmedo et al. 2013) and, therefore, do not allow the replication of complex systems where rules and processes vary with time. Accordingly, only Metronamica allows all typologies of changes to happen, whereas in the other three models the Markov matrix, and the TP maps in the case of Dinamica EGO and LCM, constrain the type of changes that take place.

Thus, there is not a one best method to deal with the system transformation uncertainty. A balance between stochasticity and model robustness, together with model flexibility to vary the processes of change, are some criteria required to allow those transformations to happen. Other advanced tools, like the self-modification algorithm in SLEUTH (Clarke 2004) or the sojourn time and saturation effect in Dinamica EGO (Soares-Filho et al. 2009) can help in dealing with this uncertainty. Also, by making use of short modelling periods, some applications try to avoid it. This however also limits their usefulness in supporting strategic planning.

Finally, there is still a lack of attention in the provision of tools to communicate the uncertainty that the models provide. No model provides enough tools to communicate to the audience most of the uncertainties of the analysis, from the problem conceptualization to the model validation. Metronamica includes a tool to obtain probability of change maps based on running the same simulation several times. This allows to account for the stochasticity uncertainty and, therefore, would be especially meaningful in the case of Dinamica EGO, due to the important stochasticity that the model can convey. Notwithstanding, this result could be inconvenient if it is not properly used. It can give to the audience a false perspective about the uncertainty of the simulation. It just accounts

for the system's uncertainty that the models try to replicate through a stochastic component. However, it does not account for all the other sources of uncertainty which we have addressed in this paper.

Given the flexibility of Dinamica EGO, which is able to perform almost any required analysis, more emphasis would be needed on the communication and awareness of the model uncertainties. The same is true for the models integrated in the TerrSet environment, and even for Metronamica, through tools provided by the Map Comparison Kit.

11.4.3. CAN THE USER CONTROL THE MODEL AND ITS UNCERTAINTIES?

The more flexibility a model offers to the user, the more chances he has to adapt the model to the studied system and its specificities, considering some of its uncertainties. In this regard, only by providing the user high control can a model deal with some sources of uncertainty, as the process variability.

Given its constrained nature, there is no room for uncertainty management in LCM. The user cannot control the core of the automatic or statistical procedures that the model uses to find out the patterns and processes of change. These methods introduce uncertainties, which must be taken for granted. Moreover, as they are data-driven, they are also very vulnerable to input data uncertainties. Depending on these, the viability of the modelling exercise can be fully questioned (Grinblat et al. 2016).

LCM just allows user intervention through the selection of one of the three possible methods for change potential evaluation supplied. However, logistic regression is just provided for pedagogic purposes (Eastman and Toledano 2018b) and the two machine learnings methods showed similar results, with the Neural Networks option being the recommendation of the developers (Eastman 2015).

Dinamica EGO, through the manual edition of the Weights of Evidence, lets the user deal with the uncertainty of the automatic change potential evaluation. However, as we have checked, user or expert criteria is also uncertain and needs to be comprehensively evaluated. Automatic or statistical methods provide repeatability, as the higher similarity between the automatic Weights of Evidence and LCM change potential maps showed. They also provide ease of calculation, since the user intervention is reduced to the minimum. As a consequence, they are the most common approaches for model calibration (Van Vliet et al. 2016).

There is a large offer of automatic and statistical methods to be selected (Li et al. 2017), each one producing different results, as the difference between automatic Weights of Evidence, machine learnings methods and logistic regression shows. Most people do not understand why those differences occur, which makes them an important source of uncertainty. It puts in question the role of these methods in democratizing the LUCCM practice (Mas et al. 2014). Accordingly, the selection of the applied method must be well reasoned, with an adequate comprehension of its specificities.

In the case of knowledge-driven calibrations, high uncertainties come from the subjectivity of the user or expert (Botterweg 1995; Sohl et al. 2016; Li et al. 2017). In this regard, Botterweg (1995) stated that the user's calibration is only valid for those users or experts who made calibration. *Metronamica* and *CA_Markov* rely on modeller and expert criteria to calibrate the model. Despite being both knowledge-driven calibrations, the final change potential maps were not very different from the ones obtained from LCM machine learning and statistical methods, which could be attributed to the specificities of the study case. Notwithstanding, similar level of uncertainties for data-driven and knowledge-driven calibrations have been also pointed out by other studies (Krueger et al. 2012).

Thus, expert or user knowledge introduces similar uncertainty to the one that arises when using automatic or statistical procedures. Even in the case of high input data uncertainty. A reason for this can be the use of historic data as a reference in knowledge-driven approaches, which is common practice (Rosa et al. 2015).

However, knowledge-based calibration gives more control to the modeller and, with it, another tool to deal with the uncertainty. It allows to fully understand the studied system and its possible developments, which are the main LUCCM objectives. The importance of expert or user knowledge in LUCCM calibration have been widely acknowledge by several authors (Hewitt et al. 2014; Van Vliet et al. 2016), even for uncertainty assessment (Uusitalo et al. 2015).

Nevertheless, total user control, as in *Metronamica*, has important limitations as well. The modeller needs to understand how hundreds of parameters work at the same time. Accordingly, he can struggle during the calibration, especially if he does not have the expertise or experience needed (Elsawah et al. 2017).

A mixture of both methods, automatic or statistical procedures, together with manual and expert adjustment, can be considered an adequate solution (Pérez-Vega et al., 2012). *Dinamica EGO* is the only model that directly allows this. It is also possible in *CA_Markov* and *Metronamica* through the use of external tools, with several papers analysing the inclusion of automatic or statistical procedures for both modelling approaches (Ghosh et al. 2017; Newland et al. 2018). These tools can be also imported to *Dinamica EGO*, as the option of calibrating this model through a genetic algorithm proves (Soares-Filho et al. 2013). For our comparison, the manual edition of weights in *Dinamica EGO* did not account for the obtained automatic weights. Consequently, that explains the high uncertainty of that simulation, the one that showed the most dissimilar output.

Regarding the simulated pattern, *Dinamica EGO* is the only model that allows the user to totally control it. Nevertheless, the flexibility that it offers to manage this uncertainty is dependent on the stochasticity of the simulation. A mean and variance of the patches different to the pixel size can increase that stochasticity. This will be all the more important as the difference between those parameters (mean and variance) and the ones of the pixel size. Simulation of spontaneous growth is more complicated in *Metronamica*, because of its *CA* nature. *CA_Markov* just provides a very simple contiguity filter to get the desired pattern, whereas there is not any specific tool to this end in LCM.

The user control of the pattern is important (Pontius Jr. and Malanson 2005) and, therefore, depending on the modelling objective and the pattern simulated, a lot of attention should be paid to the ability of the model to modify the simulated pattern when choosing a specific software.

11.4.4. CAN THE USER UNDERSTAND THE MODEL AND ITS UNCERTAINTIES?

According to Occam's razor, the optimal model is that which contains enough complexity to explain the phenomena under study, but not more (Wainwright and Mulligan 2013; White et al. 2015; Elsayah et al. 2017). Therefore, when similar results are provided by several methods, as can be generally pointed out for CA_Markov, LCM and Metronamica, the simplest model, i.e. the former one, should be chosen. Because of its simplicity, it is the one that explains more with less and, therefore, the one that may be more understandable.

However, users usually demand a minimum complexity in the models and, therefore, a very simple approach, as CA_Markov, cannot fit well with user requirements (Van Delden et al. 2011b; Elsayah et al. 2017). However, its application is very widespread (Shirley and Battaglia 2008; Kamusoko et al. 2009; Tong et al. 2012) and its use should not be discarded.

Several factors affect how a model becomes understandable and, sometimes, not the simplest one is the easiest to understand. To study this question, we distinguish between three main stages of the modelling process: quantity estimation, change potential evaluation and allocation of changes. All three are easy to understand in Metronamica, where changes take place according to change potential values defined by the user, which are also affected by a user defined random factor.

In a similar vein, CA_Markov is also very easy to understand, although allocation of changes do not fully comply with the highest transition potential values because of the applied contiguity filter (Camacho Olmedo et al. 2013). However, the obtained pattern, quite simple, is very easy to explain by the action of this filter. Moreover, the user can avoid the use of this filter or reduce its importance, making the simulation even easier to understand.

As previously stated, the main uncertainty in LCM comes from the different methods for change potential evaluation, which are also the most difficult to understand. The user cannot comprehend how the model links changes and drivers of change due to the black box nature of machine learning techniques. Consequently, the user cannot be requested to make a choice between the different techniques since he cannot understand why they provide different results. Problems of equifinality arise as well (Van Vliet et al. 2016).

The user can fully understand how changes are allocated in LCM. In addition, it is possible to modify the quantities of change, although this must be provided in the way of Markov probabilities, which are not as simple and easy to understand as the number of pixels.

For Dinamica EGO, the user can easily understand the way this model calculates the demands and obtains the change potential maps. However, the same is not always true for the allocation of changes step, due to the stochastic nature of this model. If the user parameterizes the model in a way that the stochastic component plays a key role (e.g. by deciding a mean patch size different to the pixel size or by selecting the default prune factor), the model can behave differently every time it is run, making it difficult to discern between changes due to parameter variation and those that come from the stochastic component. In this regard, sensitivity analysis with Dinamica EGO, as the ones developed by García-Álvarez (2018) and García-Álvarez and Camacho Olmedo (2016), might not be really meaningful if the stochasticity of these models is very high.

Stochasticity accounts for the uncertainty of the real world and the human behaviour, as stated in the first section of this discussion. However, it makes more difficult to understand how a model works. Thus, the stochasticity of Dinamica EGO includes advantages and disadvantages that should be carefully revised by the user, who then can execute the model with the stochasticity that fits with his objectives.

11.5. CONCLUSIONS

When working with LUCC models, there are many uncertainties which we need to manage. Through the comparison of several model software packages, we have checked how those uncertainties are different according to the model's approach. Every model has also different tools to manage and communicate these uncertainties.

Part of the uncertainties come from the system conceptualization. These can be better addressed through models specifically developed for each application. However, general frameworks, as the ones here analysed, provide more knowledge about their architecture, limits and possibilities as well as about their general uncertainty. Their use and analysis, as the results of this paper, contribute to the diffusion of LUCC modelling techniques, as user and audience have more information about the reliability and overall uncertainty of these methods.

Automatic and statistical methodologies have provided similar results to knowledge-based calibration for the analysed study region. However, they always come with uncertainties that cannot be usually controlled by the user. Accordingly, these methods are less efficient for uncertainty management than those based on user or expert knowledge. Nevertheless, when opting for this option, full information must be provided about the user or expert information to account for this uncertainty. A promising direction forward is the combination of statistical and/or automatic approaches with knowledge based ones.

Stochasticity gives answer to an important source of uncertainty of real systems. However, the way it is implemented on the models is not always satisfactory. In general, more understanding about the extent of this randomness and how it affects the model results is needed. Model flexibility to produce a range of different scenarios is also essential to deal with the uncertain evolution of the modelled systems. Thus, more attention should

be paid to the management of scenarios in LUCC modelling, developing as many tools as needed to their adequate administration.

Finally, an enhanced understanding of the uncertainty is one of the pending tasks in LUCC modelling. It can be facilitated by an improved communication of the uncertainties. None of the reviewed models offers a comprehensive procedure for uncertainty communication, which avoids the user comprehension of the model limits and, consequently, impedes the widespread diffusion of these techniques to a great range of users.

Tools that communicate part of the modelling decisions to the user can make the modelling exercise more transparent and, therefore, help in the communication of these uncertainties. Models also lack of a proper range of results that account for part of the uncertainties of the simulation. Moreover, when accounting for this uncertainty, they just focus on specific sources of uncertainty, as the one coming from the stochastic component, but not for the whole uncertainty of the modelling exercise. Giving the modeller the option of detail the uncertainty of every input and parameter or, at least, of the most important, could be a good solution to account for the modelling uncertainties in a holistic way.

V

**Discusión general
y conclusiones**

Capítulo 12

Discusión general

Existe un amplio reconocimiento académico de la existencia de incertidumbres asociadas a cualquier análisis geoespacial, incluida la modelización (Maier et al. 2016). De hecho, son numerosos los estudios que han tratado de asentar un marco teórico para el estudio de la incertidumbre y que, incluso, han llegado a caracterizar las distintas fuentes de incertidumbre asociadas a tipos específicos de datos y análisis geoespaciales (Leyk et al. 2005; Li y Wu 2006; Ascough et al. 2008; Refsgaard et al. 2013). Aún más numerosos son los esfuerzos destinados al análisis cuantitativo de fuentes concretas de incertidumbre (Kocabas y Dragicevic 2006; Nol et al. 2008; Mustafa et al. 2014; Confalonieri et al. 2016).

Sin embargo, a pesar de todo ello, no existe una gran comprensión de las incertidumbres asociadas a los análisis geoespaciales (Li y Wu 2006). Especialmente en lo relativo a aquellas incertidumbres de carácter más cualitativo y conceptual, que se han visto eclipsadas por parte de los estudios y análisis cuantitativos de la incertidumbre (Brown 2004). Van Asselt (2000), en relación con los ejercicios de modelización, realiza en tal dirección una crítica bastante dura, al afirmar que “generalmente los resultados de la validación son únicamente utilizados para vender la credibilidad científica del modelo”. Además, pese al reconocimiento de su importancia, muchos estudios siguen sin incluir información sobre la incertidumbre.

La Modelización del Cambio de los Usos y Coberturas del Suelo (*Land Use Cover Change Modelling*, LUCCM) no es, en este sentido, una excepción. De hecho, si bien se ha avanzado mucho en el conocimiento de algunas fuentes de incertidumbre, en relación con la escala de análisis empleada o con las técnicas utilizadas para llevar a cabo las distintas fases del ejercicio de modelización (calibración, simulación, validación), aún quedan numerosos campos de investigación poco explorados y hacia los que se ha prestado poca atención. Grinblat et al. (2016), Kamusoko (2012) y Lowell (2008) señalan la estructura del modelo y los datos empleados como algunos de los campos que han recibido menor interés. Por su parte, Li y Wu (2006) hablan de una excesiva atención hacia la incertidumbre de la calibración de los modelos, en un sentido cuantitativo, sin que otros aspectos esenciales y, en ocasiones, más cualitativos, como los datos empleados o la estructura del modelo, hayan recibido la merecida consideración. En una línea similar, Refsgaard et al. (2007) consideran que el estudio de la incertidumbre se encuentra demasiado centrado en los resultados finales de los modelos, sin que se haya prestado gran atención al análisis de la incertidumbre de todo el proceso de construcción y parametrización del modelo.

La mayor parte de los estudios que han abordado la influencia que los distintos datos, decisiones, herramientas, etc tienen en un ejercicio de modelización del Cambio de los Usos y Coberturas del Suelo (*Land Use Cover Change*, LUCC), no han adoptado un enfoque

claro en relación con su papel como parte de la investigación global sobre la incertidumbre. Carecen estos estudios de una perspectiva holística, que vincule esos análisis y sus conclusiones al conjunto del estudio de la incertidumbre. No plantean una conexión patente entre los resultados y conclusiones alcanzadas y la necesidad de llevar a cabo una caracterización general de las fuentes de incertidumbre, lo cual resulta necesario debido a la interdependencia que existe entre todas ellas. Solo a través de la consideración del conjunto de fuentes de incertidumbre, valorando las relaciones entre unas y otras, se puede conseguir un análisis sólido, el cual plantee unos resultados que puedan llegar a ser significativos.

Los análisis realizados como parte de esta investigación demuestran las consecuencias concretas asociadas a algunas de las principales fuentes de incertidumbre en la LUCCM. No obstante, ninguno de los análisis ejecutados ha conseguido realizar una caracterización completa de cada fuente de incertidumbre considerada. De hecho, en la mayor parte de los casos, se ha planteado como parte de la incertidumbre observada deviene del papel que otros elementos ajenos a la fuente específica de incertidumbre analizada juegan en el proceso de modelización LUCC. A modo de ejemplo, las conclusiones del Capítulo 9, en relación con la incertidumbre asociada a la escala cartográfica y la unidad mínima cartografiable en un ejercicio de modelización LUCC, demuestran como parte de esta es también dependiente de la resolución temática y de las fuentes de incertidumbres propias de los datos empleados en el análisis.

Por tanto, el estudio de la incertidumbre en la LUCCM, como en cualquier análisis geoespacial, es un reto complejo y difícil de abordar. Ningún análisis de la incertidumbre puede llevar a cabo una completa caracterización de la misma. Ni siquiera identificar todas las fuentes existentes de manera íntegra (Warmink et al. 2010). En este sentido, esta tesis supone una aproximación general al problema, la cual resulta necesaria.

Cabe avanzar en el desarrollo de estudios ambiciosos, que analicen la incertidumbre en la LUCCM y los análisis geoespaciales con una perspectiva global y holística, planteando sus propias limitaciones, pero sin caer en excesivas particularidades. Éstas constriñen la utilidad de los resultados alcanzados por parte de estudios específicos.

Por lo limitado de esta investigación, pese al enfoque general que hemos adoptado, tan sólo hemos conseguido abordar en profundidad algunos de los aspectos clave de la LUCCM vinculados a la incertidumbre. A continuación, se discute cada uno de ellos en profundidad.

12.1. LA ESCALA COMO FUENTE Y HERRAMIENTA PARA EL MANEJO DE LA INCERTIDUMBRE

Si bien la escala ha sido un tema de investigación recurrente en la LUCCM, en pocos casos se ha realizado un esfuerzo por llevar a cabo su conceptualización. Entre los trabajos realizados en esta dirección, destacan aquellos propuestos desde la ecología del paisaje (Wu 2007), la geografía (Meentemeyer 1989) y, vinculado a ésta, aplicados a los análisis

espaciales (Goodchild 2011). Sin embargo, estos estudios no han jugado un papel de catalizadores en el desarrollo de marcos teóricos de la escala aplicados a cada disciplina y campo de investigación. De hecho, en la mayor parte de los casos, los análisis que consideran la influencia de la escala, siguen teniendo una consideración parcial de este concepto, que no responde a su complejidad (Ménard y Marceau 2005; Dietzel y Clarke 2006; Blanchard et al. 2015).

El marco teórico presentado en esta tesis, que no sólo caracteriza en términos cuantitativos el concepto de la escala, sino también la concepción escalar de la realidad, así como los problemas de análisis vinculados a la misma, puede suponer una primera aproximación a este objeto de estudio desde el campo de la LUCCM. Además, puede servir de utilidad para cualquier investigador interesado en el análisis espacial. Supone así, para este campo de investigación, la revisión y unificación de algunas de las principales aportaciones realizadas en las últimas décadas sobre la conceptualización de la escala.

El marco teórico propuesto resulta especialmente significativo por cuanto pone de relieve la importancia de la escala, entendida en un sentido amplio y aglutinador, en la conceptualización de la realidad llevada a cabo en cualquier tipo de análisis geográfico y espacial. Vinculado a ese papel clave de la escala como descriptor básico del modelo conceptual subyacente, los análisis que se han realizado como parte de esta investigación han revelado que la escala, en ese sentido amplio previamente apuntado, no puede considerarse simplemente como una fuente de incertidumbre, sino también como una herramienta para su manejo.

La escala, en tanto que sinónimo del grado de abstracción o simplificación del objeto de estudio analizado, supone una fuente de incertidumbre. Esta se refiere a la diferencia entre la complejidad de cualquier sistema real y su versión simplificada. Sin embargo, reconocida la inevitabilidad de tal incertidumbre (Li y Wu 2006), cabe considerar el papel de la escala como herramienta para su manejo. La escala afecta a la forma en la que la realidad es simplificada. En función de las características del espacio analizado y nuestro objetivo de estudio, tal simplificación deberá de realizarse de una u otra forma. A modo de ejemplo, una escala de mayor detalle del que el modelo puede explicar añade más incertidumbre al estudio, respecto a una escala cuyo detalle se ajusta a la capacidad de explicación del problema estudiado. De este modo, ratificando el planeamiento de Van Delden et al. (2011), más detalle, aunque suponga una representación más fiel de la realidad, no tiene por qué corresponderse con una menor incertidumbre en nuestros análisis. De hecho, como norma general, mayor detalle supone la aparición de información y relaciones más complejas (Lee 1973; Walker et al. 2003; Lowell 2008), cuya explicación resulta, por consiguiente, más complicada.

En la elección de la escala a utilizar, resulta necesario llevar a cabo la caracterización geográfica del objeto de estudio. Leao (2016) y Lloyd (2014) hablan en este sentido de caracterizar la variabilidad y heterogeneidad del mismo. Solo una vez llevada a cabo esta caracterización, la escala o escalas de análisis puede ser propiamente seleccionadas. De esta manera, estudios de sensibilidad similares a los realizados aquí para el caso de la

resolución temática, son un paso importante en la consecución de análisis geoespaciales consistentes, sin altos grados de incertidumbre.

Para el caso de los datos espaciales, lo anterior es aplicable tanto al proceso de conceptualización de la realidad para la colección de la información, en relación con la estrategia de obtención de datos y el detalle requerido, como, una vez contamos con una fuente determinada, para llevar a cabo cualquier ejercicio de escalado. Una adecuada caracterización del paisaje de Asturias hubiera permitido entender las importantes limitaciones que supone el proceso de obtención de CORINE Land Cover (CLC) a partir de la generalización de una cartografía de mayor detalle. En este sentido, varias de las cartografías LULC comparadas en el Capítulo 7 desarrollan procedimientos particulares para la cartografía de coberturas específicas, en relación con las incertidumbres asociadas a su mapeo según la técnica global utilizada para obtener el resto de la capa LULC. Esta singularidad revela la existencia de estudios previos, de carácter metodológico, sobre la incertidumbre asociada al cartografiado de tales categorías.

12.2. LA NECESIDAD DE CONSIDERAR EL MANEJO DE LA INCERTIDUMBRE EN LA CONCEPTUALIZACIÓN DE LA HERRAMIENTA DE ANÁLISIS

Tal y como plantean Magliocca et al. (2015) y Van Vliet et al. (2016) a la hora de describir el ciclo de trabajo en un ejercicio de modelización, una de las etapas fundamentales en la realización de este análisis es la traslación del modelo conceptual a una herramienta informática, es decir, la computarización de tal modelo. Se trata de un paso vital, asimilable al que cabe realizar en cualquier tipo de análisis geoespacial.

En función de cómo la herramienta haya sido diseñada, se pueden establecer importantes limitaciones en las estrategias de manejo de la incertidumbre por parte del usuario, o incluso introducir nuevas fuentes de incertidumbre en el ejercicio de modelización. Con relación a este segundo aspecto, modelos poco transparentes, que funcionan en forma de cajas negras (*black-boxes*), resultan difíciles de entender, lo que introduce grandes incertidumbres sobre el entendimiento de los procesos modelados.

En lo que respecta a la gestión de la incertidumbre, para la LUCCM, el manejo de la incertidumbre epistémica se realiza normalmente a partir de la generación de escenarios. Modelos incapaces de llevar a cabo la producción de distintos escenarios bajo un rango de posibles hipótesis evolutivas, como Land Change Modeler (LCM), es probable que sean incapaces de manejar este tipo de incertidumbre.

Cuando son capaces de tratarla, cabe tener en cuenta la influencia que la estructura del modelo puede ejercer en los límites a los cuales tal incertidumbre ha sido considerada. En este sentido, tanto la estructura como la parametrización del modelo imponen límites en la consideración de la incertidumbre epistémica. Varios estudios han planteado como las diferencias entre los escenarios implementados en distintos modelos son mayores que las diferencias entre escenarios propuestos por un mismo modelo (Verburg et al. 2013; Prestele et al. 2016; Sohl et al. 2016). Los paradigmas asumidos en la computación del

modelo conceptual, así como en su parametrización, determinan el rango de posibles escenarios a obtener. Tales escenarios no rompen con esos paradigmas y, por tanto, sólo a través de una comparación de distintos modelos y escenarios se puede considerar completamente esa incertidumbre epistémica (Sohl et al. 2016).

Con relación a la incertidumbre aleatoria o estocástica, debida al conocimiento imperfecto sobre la realidad estudiada, varios modelos incorporan un componente estocástico que permite tener en cuenta la aleatoriedad de algunas decisiones humanas, imposibles de predecir o explicar en su totalidad. Sin embargo, como hemos visto, todo componente estocástico cuenta con algún tipo de desventaja: o la estoicidad introducida es muy limitada o bien se puede poner en peligro la estabilidad del modelo (García et al. 2011).

Dinámica EGO presenta un algoritmo estocástico de localización del cambio que, en función de la forma en la que el modelo es parametrizado, puede incorporar gran aleatoriedad en la fase de simulación. Esto complica la diferenciación de las variaciones de la simulación que son producidas por distintos parámetros o datos, de las debidas a la propia estocasticidad de la simulación. En este sentido, parte de los resultados del Capítulo 9, que ha empleado Dinámica EGO para comparar dos simulaciones LULC a partir de dos cartografías diferentes (CLC y SIOSE), adolecen de tal problema y son especialmente inciertos. Los resultados y conclusiones referidas a la incertidumbre derivada del distinto nivel de detalle del ejercicio de modelización, en función de la cartografía seleccionada, siguen siendo válidos. Sin embargo, la comparación cuantitativa de la localización de los cambios por ambos modelos es incierta, por cuanto en tal proceso ha jugado un papel muy importante el componente estocástico del modelo.

Referido al mismo tipo de incertidumbre (aleatoria o estocástica), en esta tesis se han planteado tres formas fundamentales de parametrización de un modelo LULC: a través de conocimiento experto, de manera automática a partir de métodos estadísticos, de inteligencia artificial, etc y, finalmente, a partir de una combinación de los dos métodos anteriores.

Para el área de estudio modelizada se ha comprobado como la incorporación de conocimiento experto en la calibración de los modelos ha sido fundamental. De este modo, en las simulaciones de los capítulos 9, 10 y 11 se han variado las cantidades simuladas esperadas a partir de la extrapolación de la tendencia histórica de cambio (2005-2011) por otras más modestas. Éstas últimas se han establecido de acuerdo con los cambios esperados, consecuencia del retroceso de la actividad económica desde 2008 y la caída de la construcción de vivienda, derivada de la explosión de la burbuja inmobiliaria (Romero 2010). Del mismo modo, se ha señalado de manera repetida a lo largo de la investigación las particularidades del área de estudio y su posible influencia en los resultados obtenidos. En ella, gran parte de los cambios recientes han sido objeto de iniciativa pública, ya sea a través de la urbanización de nuevas áreas urbanas a partir de vivienda protegida o bien a través de la promoción de suelo industrial (Benito del Pozo 2006). Son objeto de iniciativas puntuales y difícilmente extrapolables en el tiempo. De este modo, la asunción de los factores que determinan este cambio como aquellos que explicarán el crecimiento

futuro puede ser errónea y, por tanto, cabe matizarla de acuerdo con las opiniones de expertos.

No obstante, enfoques basados en conocimiento experto incorporan también incertidumbre, fundamentalmente fruto de la subjetividad de tal conocimiento (Botterweg 1995; Elsayah et al. 2017). El amplio debate entre enfoques estadísticos y expertos para la calibración de un modelo LULC abordado en el Capítulo 11 ha señalado las ventajas y desventajas de cada opción. No existe un método perfecto y, por tanto, una combinación de ambos puede ser la mejor opción, si bien esta debe estar de nuevo vinculada a las características y dinámicas del área de estudio. Modelos que ofrezcan varias formas de llevar a cabo la calibración de un modelo LULC o que, al menos, posean la flexibilidad necesaria para incorporar métodos distintos al implementado, son así una buena opción para manejar este tipo de incertidumbre.

En cualquier caso, enfoques completamente automáticos o estadísticos plantean un buen número de desventajas, que hacen recomendable evitarlos. Para el caso de los análisis realizados en esta tesis, las incertidumbres de las cartografías empleadas, relatadas en los capítulos 7 y 8, junto a las especificidades del área de estudio, anteriormente mencionadas y desarrolladas en profundidad en el Capítulo 2, suponen limitaciones muy significativas a la adecuada comprensión mediante este tipo de métodos de los factores que determinan el *Land Use Cover Change*. Pone ello de relieve la escasa flexibilidad y aplicabilidad práctica en casos reales de este tipo de modelos, que llegan a primar la técnica metodológica por encima del desarrollo conceptual. En tal sentido, los planeamientos de Funtowicz y Ravetz (1993) y Lee (1973) cobran aquí especial significatividad. Los primeros señalaron que los ordenadores han comenzado a ser sustitutos de un pensamiento disciplinado y del rigor científico. Lee (1973), por su parte, señala como uno de los mayores errores de los modelos a gran escala (escaso detalle y gran extensión) la objetividad, que conduce a un empirismo vacío, sin conocimiento (*empty-headed*).

12.3. LOS DATOS Y SU PAPEL EN LA INCERTIDUMBRE DEL ESTUDIO REALIZADO

Como han revelado los resultados y conclusiones del Capítulo 9, la incertidumbre de un ejercicio de modelización es altamente dependiente de los datos utilizados. La mayor parte de los análisis geoespaciales confían en datos previos para obtener una serie de resultados. Las incertidumbres de los datos afectarán a los resultados alcanzados y, por tanto, pueden condicionar la utilidad del estudio.

Li y Wu (2006) plantean como la falta de buenos datos, es decir, de datos con baja incertidumbre, es una de las principales limitaciones para la realización de análisis de incertidumbre. En este sentido, a menudo, estos análisis suelen tomar datos como referencia para comprobar la idoneidad de la representación espacial lograda, ya sea de un espacio concreto o de un determinado proceso.

En el caso de las fuentes cartográficas LULC, esta incertidumbre suele ser alta. Como se ha detallado en el Capítulo 7, muchas series temporales cuentan con variaciones en su metodología de producción, las cuales introducen en la serie cambios de origen técnico, no reales. Con ello, la utilización de la serie temporal para medir los cambios LULC para una determinada área de estudio incorpora notables fuentes de incertidumbre.

Del mismo modo, muchos de los métodos empleados para la obtención de estas fuentes cartográficas son notablemente inciertos. Las técnicas de clasificación supervisada y no supervisada se basan en la información de la reflectancia de las cubiertas. Se trata de un dato que no es claramente distinto para uno y otro tipo de cubiertas y que, además, se encuentra afectado por ruidos, como el atmosférico (Chuvienco 2016). Por su parte, la fotointerpretación queda afectada por la subjetividad propia del fotointérprete (Castilla y Hay 2007; Verburg et al. 2011). En consecuencia, la precisión de estos mapas rara vez es superior al 90% y, en varias ocasiones, llega a ser inferior al 70%. Mientras, la cantidad de cambio LULC suele ser pequeña. En nuestra experiencia, raramente mayor de un 5 o 10% de la superficie analizada. Estos cambios pueden encontrarse así afectados por una gran incertidumbre. Para combatir esta, Fritz et al. (2011) y Verburg et al. (2011) proponen llevar a cabo una identificación de los cambios LULC a partir de la información espectral de imágenes de satélite, en vez de confiar en la información suministrada por las distintas cartografías.

Si bien cabe estudiar y considerar en detalle la influencia de estas incertidumbres en nuestros análisis, es necesario admitir la inevitabilidad de las mismas (Longley et al. 2011). No existen datos perfectos, ni completamente certeros. En consecuencia, se debe trabajar en el reconocimiento de estas incertidumbres, así como en paliar su influencia en los resultados de nuestros análisis. Cuestionamientos sobre la necesidad de descartar cierto tipo de datos, por las incertidumbres que contienen, como plantean Grinblat et al. (2016), suponen una aseveración peligrosa.

Todo dato es incierto. Planteamientos sobre la menor incertidumbre de datos más detallados respecto a otros que implican una mayor abstracción pueden ser engañosos. Así, un mayor detalle puede dar lugar a una incertidumbre mayor, debido a la necesidad de ser más precisos en la delimitación de los distintos elementos representados (Lowell 2008).

Para el caso de la LUCCM, en relación con lo apuntado en el apartado anterior, las características del modelo seleccionado determinan el impacto que las incertidumbres de los datos empleados juegan en la calibración del modelo. Modelos automáticos que, además, ofrezcan poca flexibilidad, trasladarán a los resultados toda la incertidumbre de los datos. En estos modelos, los parámetros se establecen a partir del estudio y análisis de las fuentes de datos introducidas por el usuario. Al contrario, modelos que permiten una mayor intervención del usuario, a partir de la modificación de algunos de sus parámetros, incorporan formas de manejar la incertidumbre asociada a los datos. Reconociendo ésta,

el usuario puede ser consciente de cómo tal incertidumbre puede influir en el funcionamiento y asunciones del modelo y, en consecuencia, variar su comportamiento de acuerdo con lo esperado en la realidad.

La validación de modelos LULC se suele hacer también a partir de la comparación de los resultados obtenidos con datos de referencia (Van Vliet et al. 2016). Las incertidumbres de éstos pueden influir en los resultados del ejercicio de validación. En este sentido, los resultados del Capítulo 9 plantean como cambios más pequeños que la unidad mínima cartografiada de la cartografía empleada pueden estar correctamente simulados, de acuerdo con los cambios que han ocurrido en la realidad, pero ser detectados como error como consecuencia de la abstracción realizada por el mapa. En este sentido, Aguejda et al. (2017) plantean la necesidad de evaluar las incertidumbres de los datos utilizados como referencia, de tal manera que se puedan plantear las incertidumbres que el propio ejercicio de validación contiene.

Capítulo 13

Conclusiones

Los análisis efectuados han refrendado la hipótesis inicialmente propuesta. Tanto las fuentes empleadas, como los ejercicios de modelización realizados, cuentan con una gran cantidad de incertidumbres. Éstas son, en parte, dependientes de la escala o escalas de análisis, entendida ésta como elemento clave en la conceptualización del sistema estudiado. También del software de modelización empleado.

No obstante, las fuentes de incertidumbres en un ejercicio de modelización, así como en cualquier análisis geoespacial, son innumerables e interdependientes. Su identificación y estudio es una tarea titánica que, sin embargo, resulta necesaria.

Al igual que reconocemos la inevitabilidad de la incertidumbre, cabe reconocer también la imposibilidad de lograr una caracterización completa de la misma. En consecuencia, si bien la identificación y estudio de las fuentes de incertidumbre es una tarea indispensable, cabe adoptar planteamientos realistas que, analizando el problema desde una perspectiva global y holística, reconozcan sus propias limitaciones.

No se pueden llevar a cabo estudios sobre la incertidumbre que no cuestionen sus propios análisis y las innumerables incertidumbres que estos contienen. Entre ellas, la propia delimitación de la incertidumbre estudiada. Ésta estará indudablemente relacionada con un sinfín de aspectos, los cuales, si bien resulta imposible abordar al mismo tiempo, al menos sí cabe reconocer y, en su caso, mencionar. Se da con ello respuesta a la necesidad de transparencia y comunicación planteada en numerosas ocasiones a lo largo de esta investigación.

En esta tesis hemos conseguido estudiar algunas de las fuentes de incertidumbre más relevantes en la modelización del Cambio de Usos y Coberturas del Suelo, referidas fundamentalmente a la conceptualización del objeto de estudio. En todos los casos se han planteado las limitaciones de las conclusiones alcanzadas y la interdependencia de un tipo de incertidumbres con otras. El área de estudio escogida se ha señalado siempre como uno de los principales condicionantes de los resultados alcanzados, lo que obliga a la realización de análisis similares para otros ámbitos, de características y dinámicas opuestas a las aquí apuntadas. Los software de modelización empleados son también una pequeña muestra de la amplia oferta hoy en día disponible. Además, tan sólo hemos hecho uso de un grupo de técnicas de análisis que, si bien proporcionan información diferente y complementaria, pueden ocultar parte de la información que otros métodos son capaces de revelar. También los datos han constituido una limitación principal, tanto por su escasez, problema generalmente común al conjunto de los análisis geoespaciales, como por sus características y complejidad, especialmente para el caso del SIOSE.

Con todo, con esta investigación se ha intentado transmitir la complejidad de un ejercicio de modelización y las numerosas e importantes fuentes de incertidumbre que

puede contener. Éstas pueden ser previamente conocidas, aunque no se haya estudiado su extensión e importancia (*known unknowns*), o bien completamente desconocidas (*unknown unknowns*). En este último caso, por tanto, el usuario ni siquiera conoce que existen. De ahí la necesidad de plantear la complejidad de este tipo de estudios. Solo así usuarios y audiencia pueden ser conscientes, en buena medida, de las limitaciones asociadas al análisis efectuado.

Además de reconocer la complejidad de la incertidumbre y su afección al estudio realizado, el usuario tiene capacidad para llevar a cabo, en cierta medida, su control. En lo que respecta al modelo seleccionado, se pueden desarrollar software específicos, adaptados a las características del objeto de estudio. No obstante, se trata de una tarea muy laboriosa que, además, es muy exigente en tiempo. Especialmente si se quiere conocer la robustez de estas herramientas y, vinculado a ella, sus posibles incertidumbres. El usuario puede elegir también la escala más adecuada a su objeto de estudio. No obstante, a la hora de tomar esta decisión, resulta necesario llevar a cabo una clara caracterización geográfica del objeto de estudio, y especialmente, de su variabilidad.

En todos los casos, la información extraída o las estrategias adoptadas tan sólo sirven de ayuda en la toma de las decisiones más apropiadas para conducir el análisis, en la forma que este contenga las menores incertidumbres posibles. De este modo, el usuario tiene capacidad para controlar la incertidumbre, pero nunca existe una solución perfecta y, a menudo, se pueden plantear varias opciones, cada una con un diferente grado y tipos de incertidumbre. En estos casos, el usuario debe tomar la decisión más adecuada para su análisis y sus propósitos, equilibrando aspectos habitualmente importantes, como la capacidad de entendimiento del análisis por parte de la audiencia, el realismo, la precisión o la disponibilidad de datos y recursos.

En conclusión, el estudio y caracterización de la incertidumbre es una tarea de enorme dificultad que, sin embargo, no puede ser olvidada. Resulta vital y, por tanto, se deben de seguir realizando esfuerzos en tal dirección. Esfuerzos que, por la complejidad que este campo de trabajo entraña, solo pueden perseguir una aproximación al estudio del problema, tal y como hemos hecho en el caso de esta tesis doctoral. De esta forma, el estudio de la incertidumbre debe ir siempre acompañado de objetivos y planes de trabajo realistas, que den luz a usuarios y audiencia sobre el problema de la incertidumbre, en vez de introducir más confusión.

VI
Notas técnicas

Nota Técnica A

Software de modelización del cambio de usos y coberturas del suelo

A.1. CA_MARKOV

CA_Markov es descrito por sus propios desarrolladores como un procedimiento para llevar a cabo la predicción de las cubiertas del suelo (*land cover prediction procedure*) (Eastman y Toledano 2018a). A diferencia del resto de modelos utilizados en esta tesis, la herramienta que integra el modelo tan solo lleva a cabo el proceso de localización del cambio de los usos y coberturas del suelo (Fig. A.1). Es decir, solo se puede realizar con ella la etapa de simulación de un ejercicio de modelización del Cambio de Usos y Coberturas del Suelo (*Land Use Cover Change*, LUCC). Para la calibración y validación de la simulación es necesario contar con otras herramientas.

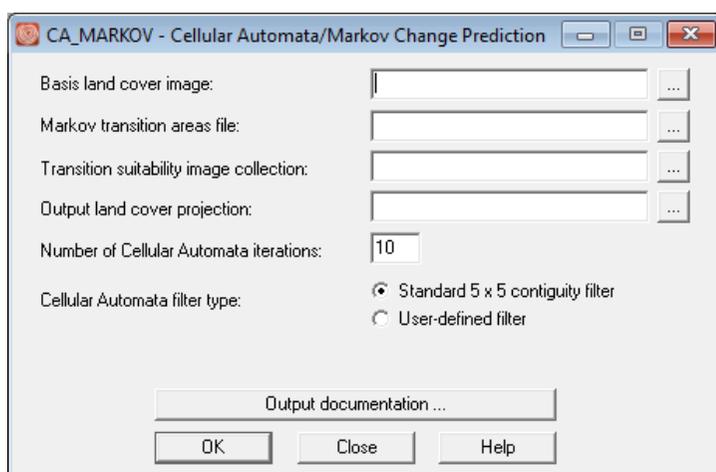


Figura A.1. Interfaz de usuario del modelo CA_Markov. El usuario especifica los datos a utilizar, así como algunos parámetros, como el número de iteraciones del autómata celular y el filtro de contigüidad empleado en el funcionamiento de éste

El usuario puede encontrar herramientas para tal fin en el software TerrSet, donde CA_Markov se integra. Sin embargo, esto no resulta estrictamente obligatorio y, en el caso de algunas opciones, como la creación de mapas de cambio potencial, los desarrolladores tan solo proporcionan una recomendación sobre un método. De este modo, el usuario puede utilizar el método que prefiera o, en su caso, optar por métodos ajenos a TerrSet.

Es común en la literatura académica la referencia al modelo Cellular Automata-Markov en un sentido estándar, sin vincularlo a ningún tipo de herramienta o software en particular (Kamusoko 2012; Sinha y Kimar 2013; Aburas et al. 2017; Ghosh et al. 2017). Se trata así de la combinación de los autómatas celulares con las cadenas de Markov y

otro conjunto de técnicas, para llevar a cabo la simulación del Cambio de los Usos y Coberturas del Suelo (*Land Use Land Cover Change*, LUCC).

Las cadenas de Markov se emplean para el cálculo de las probabilidades de cambio de los usos y coberturas de suelo. Los autómatas celulares se suelen implementar, a través de un filtro de contigüidad, para conseguir un patrón del cambio más similar al real. Se basa así en la idea de que los usos o coberturas tienden a agruparse, de tal manera que la localización de un nuevo uso o cobertura se suele realizar preferentemente en áreas próximas a espacios ya ocupados por el mismo. Dos procesos más componen el proceso de modelización: la creación de las áreas de cambio potencial y el algoritmo de localización del cambio.

Es respecto a la producción de los mapas de cambio potencial donde más variedad de enfoques existen entre las distintas aplicaciones de los modelos Cellular Automata-Markov propuestos. Ghosh et al. (2017) llevaron a cabo una revisión de algunos de ellos y Sakieh et al. (2016) realizan una evaluación de las diferencias producidas por distintos métodos de creación de mapas de cambio potencial (algoritmo genético, Evaluación Multicriterio, redes neuronales (MLP), regresión logística) en los resultados de un modelo Cellular Automata-Markov.

Menos información existe acerca de los algoritmos de localización del cambio utilizados. En la mayor parte de los estudios que hemos revisado, basados en el marco de trabajo propuesto por Terrset, lo habitual es utilizar el algoritmo de localización multiobjetivo implementado en este software (Eastman 2015).

El modelo CA_Markov de TerrSet recomienda el empleo de la Evaluación Multicriterio para el primer paso, y localiza los cambios de acuerdo con el algoritmo MOLA. Además, TerrSet incorpora una función para el cálculo de las probabilidades markovianas (MARKOV). A continuación, se describen en detalle cada una de las fases que componen un ejercicio de modelización en CA_Markov (Fig. A.2).

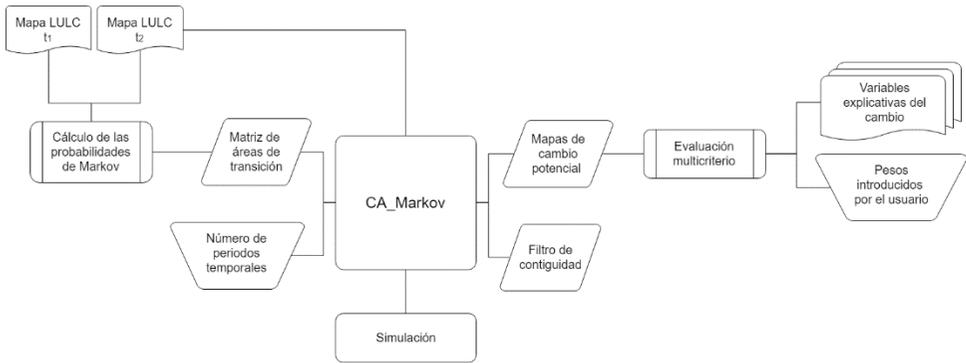


Figura A.2. Esquema del funcionamiento del modelo CA_Markov. Se indican los datos que el modelo necesita para su funcionamiento, así como su habitual forma de obtención. Fuente: elaboración propia

A.1.1. CÁLCULO DE LAS PROBABILIDADES MARKOVIANAS DEL CAMBIO DE USOS Y COBERTURAS DEL SUELO

CA_Markov requiere para su funcionamiento de una matriz de transiciones que indique el cambio, en píxeles, entre cada categoría y el resto de clases que componen el mapa, así como la cantidad de píxeles que no cambian de condición y, por tanto, siguen perteneciendo a la misma clase (Tabla A.1). Si bien el diseño del modelo plantea su obtención a partir de una matriz de probabilidad markoviana, en la práctica el usuario puede obtener esta matriz de la forma que considere, incluso de manera manual a partir de conocimiento experto.

Tabla A.1. Ejemplo de matrices de probabilidades (abajo) y áreas (arriba) de cambio para un modelo LUCC simple conformado por dos categorías: artificial y no artificial

	Artificial	No artificial
Artificial	494	0
No artificial	248	13054

	Artificial	No artificial
Artificial	1.0000	0.0000
No artificial	0.0186	0.9814

Tomando como referencia el método indicado por los desarrolladores del modelo, esta matriz se suele obtener a partir de su correspondiente matriz de probabilidades markovianas (Tabla A.1). En TerrSet, ambas forman parte del resultado de la función MARKOV. Ésta obtiene tales matrices para un año específico en el futuro (t_2), a partir de la comparación de dos mapas de Usos y Coberturas del Suelo (*Land Use Land Cover*, LULC) para dos momentos distintos en el pasado (t_0 y t_1).

Dependiendo de la fecha de predicción elegida (t_2), el cálculo de la matriz de Markov es distinto. Si la fecha elegida es un múltiplo del periodo de entrenamiento ($t_0 - t_1$), la matriz de probabilidad de Markov se obtiene como resultado de la potencia de la matriz base (ej. x^1 , x^2). De lo contrario, el cálculo es más complejo, obteniéndose tres matrices a partir de la potencia de la matriz base y calculándose la probabilidad final a partir de una regresión cuadrática. Mas et al. (2014) resumen las dos formas de obtención de la matriz de probabilidad markoviana, si bien información detallada de tal cálculo puede ser encontrada en la ayuda de TerrSet.

La función MARKOV de TerrSet permite indicar el grado de error o incertidumbre de los mapas utilizados para su cálculo. Sin embargo, esto introduce importantes modificaciones en las probabilidades markovianas obtenidas. La consideración de error o incertidumbre reduce la importancia de la persistencia e incrementa el posible cambio, que puede ser fácilmente sobreestimado (Mas et al. 2014). De esta manera, este parámetro debe de ser utilizado con sumo cuidado, ya que puede afectar de manera notable a las probabilidades de cambio consideradas en el ejercicio de modelización.

A.1.2. CREACIÓN DE LOS MAPAS DE CAMBIO POTENCIAL A PARTIR DE LA EVALUACIÓN MULTICRITERIO

Como se ha comentado, la ayuda de TerrSet recomienda la Evaluación Multicriterio como método para llevar a cabo la creación de los mapas de cambio potencial. TerrSet incluye una función específica para llevar a cabo este tipo de análisis (MCE).

Entendemos la Evaluación Multicriterio como un conjunto de técnicas que, a partir de la utilización de una serie de variables y consideraciones expertas, es decir, de una serie de criterios, determina las áreas más y menos propicias para un determinado fin. Se trata así de una técnica que permite asistir en el proceso de toma de decisiones (Gómez Delgado et al. 2006).

Este análisis se construye a partir de dos tipos de criterios: factores y restricciones (Gómez Delgado et al. 2006). Los primeros son variables generalmente continuas que muestran el grado de idoneidad de un área de estudio para un determinado fin de acuerdo con una variable específica (ej. según la accesibilidad al sistema viario). Al contrario, las restricciones suelen ser mapas binarios que indican aquellas áreas donde la idoneidad para el fin estudiado es nula, es decir, donde no se puede observar el proceso o característica evaluada.

Estos criterios son inicialmente estandarizados, de acuerdo con la misma escala de medida. Posteriormente, se les asigna un peso específico para la construcción del mapa potencial final (Paegelow 2018). La asignación de estos pesos es realizada, como norma general, y también para el caso de la herramienta de TerrSet, a partir de la matriz de Saaty (Paegelow y Camacho Olmedo 2005). En ella, el usuario evalúa los criterios por pares, estableciendo la importancia de cada criterio sobre el otro que se evalúa según la escala de valores indicada en la Figura A.3. En su conjunto, estas valoraciones son transformadas en un peso numérico específico, proceso que describen en cierto detalle Galacho Jiménez y Arrebola Castaño (2013).

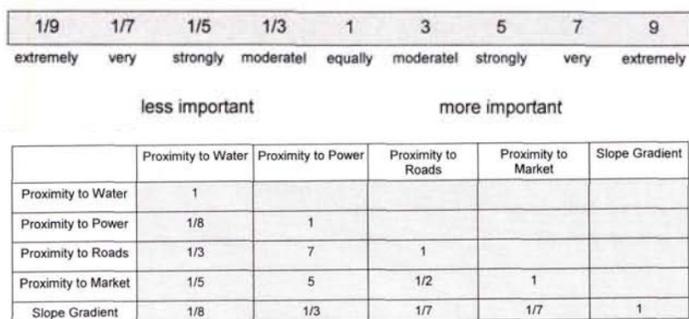


Figura A.3. Escala de juicios de valor utilizados en la construcción de la matriz de Saaty (arriba) y ejemplo de matriz para cinco factores (abajo). Fuente: tomado de Eastman et al. (1995)

Una vez se suman los diferentes criterios con acuerdo a los pesos obtenidos se obtiene, para el caso que aquí nos interesa, un mapa de cambio potencial para un determinado fin

o categoría (Fig. A.4). El proceso debe ser posteriormente repetido para cada una de las categorías que componen los mapas LULC utilizados en el ejercicio de modelización.

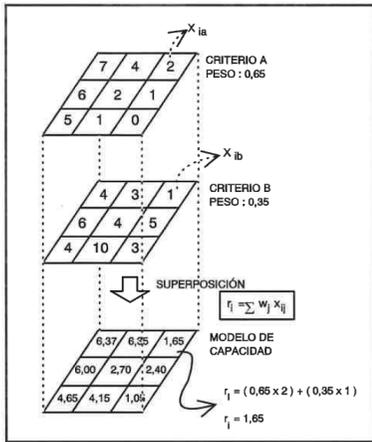


Figura A.4. Ejemplo teórico de una Evaluación Multicriterio, construida a partir de dos factores, con distinto peso. Fuente: tomado de Gómez Delgado et al. (2006)

Una descripción más detallada de la Evaluación Multicriterio, enfocada de forma específica a la modelización del Cambio de los Usos y Coberturas del Suelo (*Land Use Cover Change*, LUCC) puede encontrarse en Paegelow (2018) y Paegelow y Camacho Olmedo (2005).

A.1.3. LA SIMULACIÓN

Una vez contamos con los mapas LULC utilizados como base del ejercicio de modelización, la matriz de cambio de Markov y los mapas de cambio potencial, ya se puede llevar a cabo la simulación propiamente dicha (Fig. A.2).

La matriz de cambio debe indicar las posibles transiciones entre todas las categorías que componen los mapas LULC utilizados. Además, se debe incluir también un mapa de cambio potencial para todas las clases. No obstante, en tanto el usuario suele centrar su interés en la modelización del cambio de un conjunto de usos o coberturas específicas, se puede optar por considerar ciertas categorías como invariables y, por tanto, evitar su simulación. Para ello, se debe modificar manualmente la matriz de Markov, de tal manera que para las clases no objeto de simulación la persistencia sea total y el cambio nulo. Por su parte, los mapas de cambio potencial se pueden sustituir por una imagen plana, en tanto no hay cambio susceptible de ser simulado.

En el proceso de simulación de CA_Markov juega un papel muy relevante el filtro de contigüidad, que reevalúa para cada periodo temporal de la simulación (*time step*) el valor del cambio potencial para cada categoría, en función de su proximidad a las áreas donde esa categoría ya se encuentra localizada (Fig. A.5). No obstante, la importancia y el efecto causado por este filtro de contigüidad dependerá de sus características. El filtro por defecto en CA_Markov es un filtro simple 5x5 (Fig. A.6). Sin embargo, el usuario puede

definir este de acuerdo a sus necesidades e, incluso, prescindir de su influencia en la simulación realizada (Camacho Olmedo et al. 2015). La Figura A.6 recoge algunos de los posibles filtros que el usuario puede utilizar.

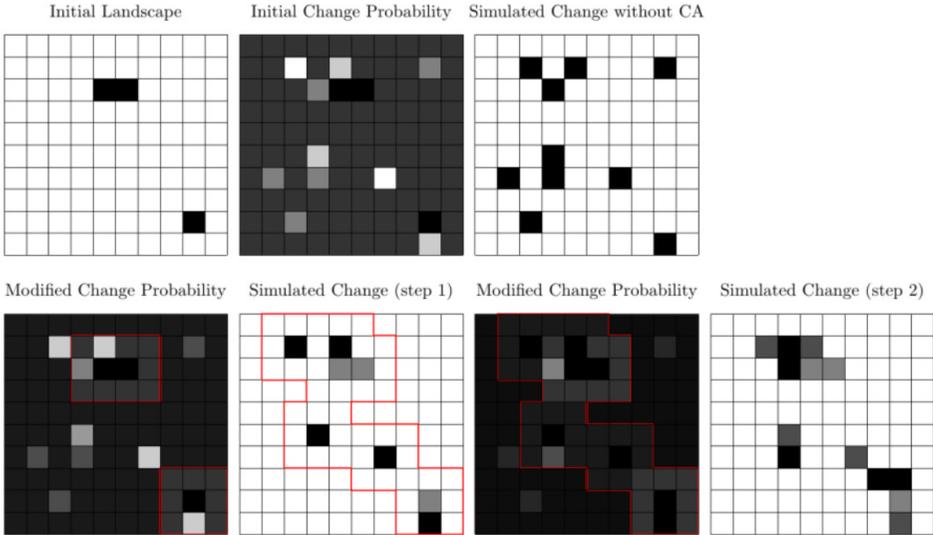


Figura A.5. Ejemplo teórico de la influencia del filtro de contigüidad en el proceso de simulación de CA_Markov. El ejemplo compara la simulación sin filtro de contigüidad (arriba) con la simulación con un filtro 3x3 con una vecindad de 8 celdas (abajo). Fuente: tomado de Camacho Olmedo y Mas (2018)

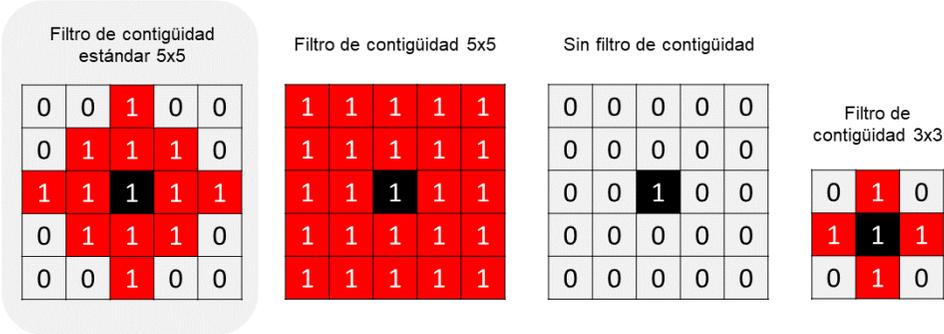


Figura A.6. Ejemplos de filtros de contigüidad que pueden emplearse en CA_Markov. A la izquierda, el filtro establecido por defecto. Fuente: elaboración propia

Finalmente, la localización de los cambios que tienen lugar se realiza de acuerdo con una función de localización multiobjetivo (*Multi-Objective Land Allocation, MOLA*). Esta función permite solventar los conflictos entre píxeles que pueden cambiar a más de una categoría. Lo hace de acuerdo con la regla de la distancia mínima al punto ideal (Fig. A.7) (Eastman et al. 1995). El MOLA se aplicado en CA_Markov para cada periodo temporal (*time step*) en el que se ejecuta la simulación (Camacho Olmedo 2018).

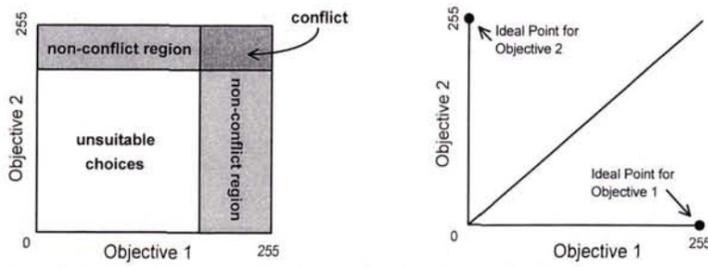


Figura A.7. Representación gráfica de la regla de la distancia mínima al punto ideal utilizada para solventar la elección entre dos o más objetivos conflictivos. Fuente: tomado de Eastman et al. (1995)

A.1.4. VALIDACIÓN Y OPCIONES EXTRAS DEL MODELO

Debido a su simplicidad, la aplicación CA_Markov no incluye ningún tipo de herramienta para llevar a cabo la validación de la simulación realizada, para la construcción de escenarios o para otro tipo de aspectos, como la regionalización del modelo.

No obstante, el usuario puede hacer uso de las técnicas que, a este respecto, se encuentran disponibles en TerrSet. El Macro Modeler es, en este sentido, una herramienta muy potente que permite al usuario concatenar varios análisis al mismo tiempo (Eastman 2015). Esto puede ser de utilidad para ejecutar varios modelos a la vez, cada uno con distintos parámetros. De hecho, jugando con el filtro de contigüidad, se pueden concatenar dos modelos de cara a replicar, en cierta medida, el comportamiento de las funciones *expand* y *patcher* en Dinámica EGO (Soares-Filho et al. 2009).

Entre las técnicas de validación incluidas en TerrSet podemos mencionar las herramientas de tabulación cruzada, varias métricas espaciales, el cálculo de índices de correlación y autocorrelación, así como la estimación del acuerdo en la cantidad y en la localización (Eastman 2015).

A.2. DINAMICA EGO

Dinámica EGO puede considerarse como un tipo de modelo Cellular Automata-Markov (Kamusoko 2012), al igual que CA_Markov. De esta manera, lleva a cabo el cálculo de las probabilidades del cambio de usos y coberturas del suelo a partir de una matriz markoviana y, además, emplea un componente de autómatas celulares en la localización del cambio simulado.

No obstante, se trata de un modelo bastante más complejo que CA_Markov. En este sentido, puede considerarse como una auténtica herramienta SIG, por cuanto en este software pueden ejecutarse un gran número de geoprocursos, similares a los realizados por cualquier Sistema de Información Geográfica (SIG). Rodrigues y Soares-Filho (2018) realizan una breve descripción de las potencialidades y posibles usos de este software. Se trata de un software muy flexible, que permite al usuario construir un modelo a partir de los componentes que desee. Además, cuenta con una interfaz de trabajo gráfica y muy intuitiva, que facilita el proceso de construcción del modelo de acuerdo con las necesidades del usuario (Fig. A.8).

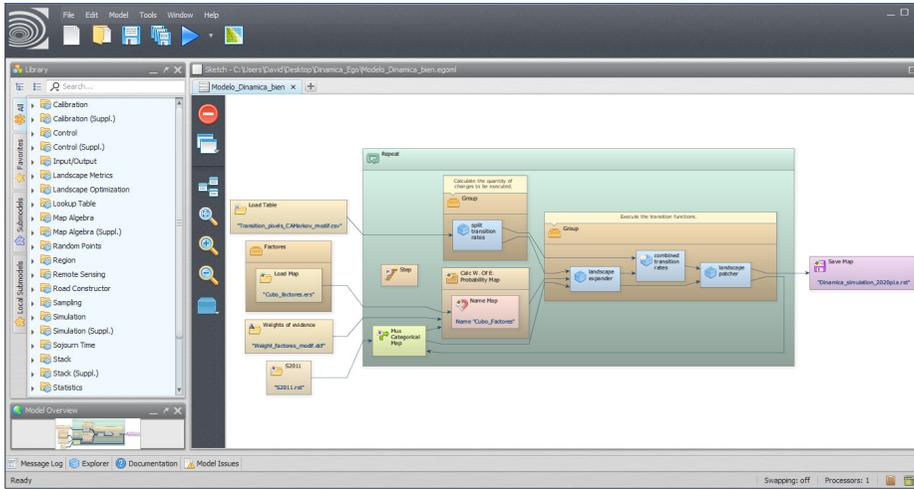


Figura A.8. Interfaz del modelo Dinamica EGO. En la imagen se observa la representación gráfica de un modelo LULC implementado con este software. En el rectángulo verde quedan inscritos los procesos que conforman las partes del modelo: el cálculo de las cantidades de cambio, de los mapas de cambio potencial, así como la localización del cambio. Fuera del rectángulo, aparecen los datos de entrada y de salida del modelo

El modelo cuenta con dos algoritmos estocásticos de localización del cambio (*expander* y *patcher*), que incorporan la filosofía de los autómatas celulares. Además, ofrece dos alternativas para la producción de los mapas de cambio potencial: algoritmo genético (*genetic algorithm*) y pesos de evidencia (*Weights of Evidence*). No obstante, para ambos casos, si bien estos son los métodos disponibles por defecto, el usuario puede desarrollar variantes o nuevos métodos a partir de las herramientas proporcionadas por el software.

A continuación, se detalla cada una de las fases del proceso de modelización de Dinamica EGO (Fig. A.9), centrándonos en aquellas técnicas y opciones empleadas en la realización de esta investigación.

A.2.1. CÁLCULO DE LAS PROBABILIDADES MARKOVIANAS DEL CAMBIO DE USOS Y COBERTURAS DEL SUELO

Al igual que CA_Markov, Dinamica EGO obtiene las cantidades a simular a partir de una matriz de probabilidad de Markov que, posteriormente, se traduce en una matriz de áreas, expresadas en píxeles.

El usuario puede obtener esta matriz markoviana de manera automática a partir de la comparación de dos mapas LULC, o bien introducirla manualmente, ya sea en forma de matriz de probabilidades o de áreas. Además, Dinamica EGO permite variar la matriz utilizada a lo largo del periodo temporal que dura la simulación (Camacho Olmedo et al. 2018). Esto permite modificar las tasas de cambio LULC de la simulación, de acuerdo con la evolución de las condiciones socioeconómicas del sistema estudiado.

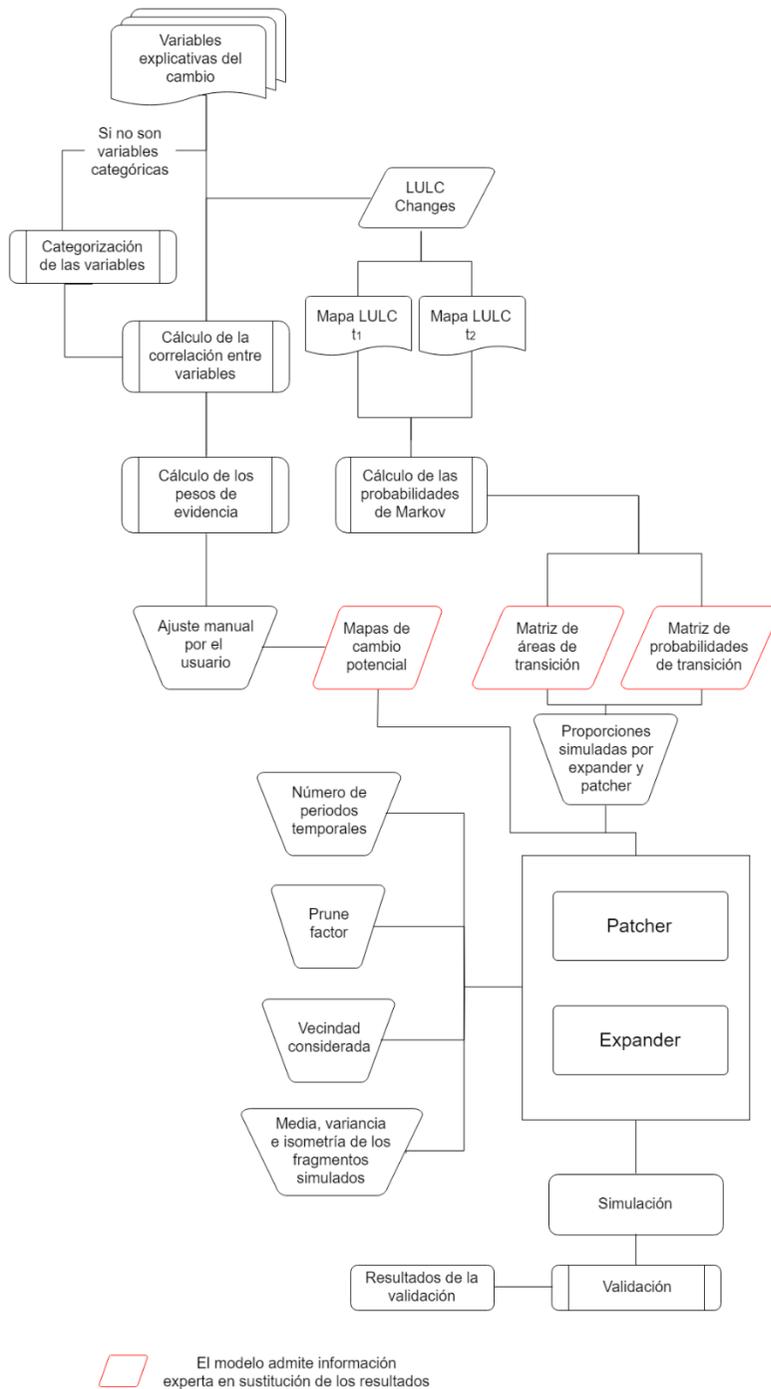


Figura A.9. Esquema del funcionamiento de Dinamica EGO. Se representa tan sólo el procedimiento tradicional y básico de modelización LUCC incluido en este software, sin considerar las opciones adicionales que ofrece el modelo. Además, el usuario puede decidir si ejecutar este utilizando las dos funciones de modelización que incluye (*patcher* y *expander*) o bien solo a partir de una de ellas. Fuente: elaboración propia

La matriz de probabilidad markoviana obtenida a partir de la comparación de los dos mapas utilizados puede ser transformada en una matriz anual (Mas et al. 2014), o bien adoptar un periodo temporal único, idéntico al del periodo de calibración (Soares-Filho et al. 2009). En este último caso, la simulación a futuro del ámbito de estudio solo se puede realizar en periodos temporales que sean múltiplos del intervalo de calibración. La forma en la que ambas matrices son calculadas se puede consultar en la ayuda de Dinamica EGO.

Para el cálculo de la matriz anual es necesario que esta matriz de cambio sea ergódica (Soares-Filho et al. 2009). En caso contrario, el programa facilita un submodelo para su cálculo (Calc Net Transition Rates). No obstante, las cantidades estimadas mediante éste son solo una aproximación de las cantidades de cambio reales medidas sobre los mapas LULC empleados.

A.2.2. CREACIÓN DE LOS MAPAS DE CAMBIO POTENCIAL A PARTIR DE LOS PESOS DE EVIDENCIA

Dos son los métodos incluidos en Dinamica EGO para la obtención de los mapas de cambio potencial (Mas et al. 2014). No obstante, los pesos de evidencia (*Weights of Evidence*) es el método habitualmente empleado y el seleccionado también en la realización de los ejercicios de modelización que conforman parte de esta tesis.

Sus ventajas pasan por la fácil interpretación de los resultados, así como por la sencillez de su cálculo (Kamusoko 2012). No obstante, Mas et al. (2014) señalan como este procedimiento es más propenso a sobreajustar la relación estadística encontrada entre la variable dependiente y las variables independientes que otros, como las redes neuronales.

Los pesos de evidencia se basan en el teorema de Bayes y, por tanto, en la idea de la probabilidad condicional. Según ésta, conocida la probabilidad de un elemento dado otro, podemos estimar la probabilidad de este último de acuerdo con la presencia o comportamiento del primer elemento (Bayes 1763). Aplicado al caso de la modelización LUCC, conocida la probabilidad de que una serie de variables explicativas (ej. accesibilidad a las redes de transporte) produzcan un cambio LUCC (ej. no urbano a urbano), podemos estimar la probabilidad del cambio estudiado, dado ese conjunto de variables.

Los pesos de evidencia se obtienen así a partir de la relación entre una determinada transición de cambio LUCC (ej. no urbano a urbano) y las variables introducidas para explicar tal cambio. De este modo, a diferencia de CA_Markov, no se valora aquí el potencial para la localización de una categoría, sino la probabilidad de cambio de una transición específica o de un conjunto de ellas (Camacho Olmedo et al. 2013).

Los pesos obtenidos pueden ser positivos, en caso de probabilidad de ocurrencia positiva, o negativos, en caso contrario (Mas 2018). Mas (2018) realiza una breve y gráfica descripción de cómo los pesos de evidencia son calculados para el caso de Dinamica EGO.

Dos condiciones se deben cumplir para el cálculo de los pesos de evidencia. En primer lugar, las variables explicativas empleadas deben de ser categóricas. No obstante, Dinamica EGO incorpora una herramienta para llevar a cabo la transformación de variables continuas en categóricas, manteniendo la estructura de los datos (Soares-Filho et al. 2009). Además, las variables no deben estar correlacionadas. Para evaluar este aspecto, el modelo incorpora dos índices de correlación: el coeficiente de Cramer V y el Joint Information Uncertainty, brevemente descritos en Maeda et al. (2011). Si bien no existe un acuerdo generalizado sobre el umbral que debe de ser empleado para considerar que una variable se encuentra correlacionada con otra, valores mayores a 0.5 para el coeficiente de Cramer V se suelen interpretar como sinónimo de una alta correlación (Kamusoko 2012).

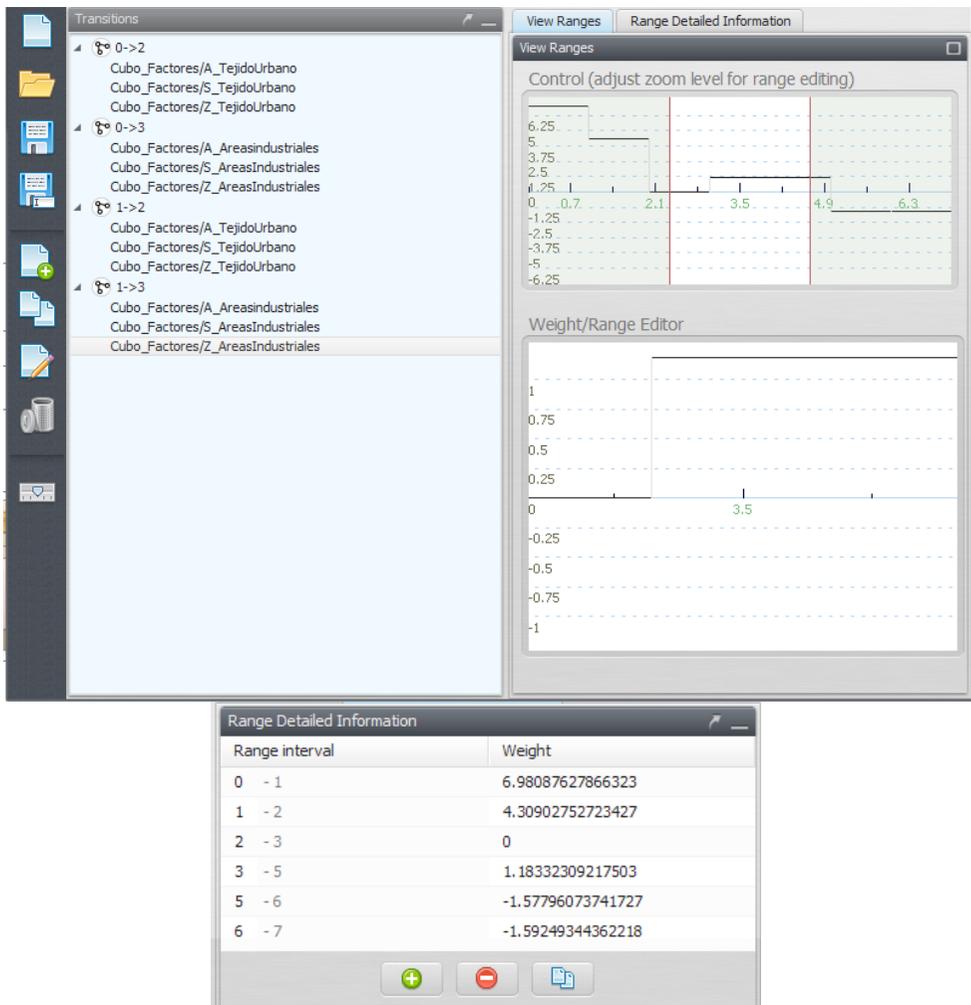


Figura A.10. Interfaz gráfica de Dinamica EGO para la modificación manual de los pesos de evidencia de acuerdo con el conocimiento experto. El usuario puede modificar manualmente el peso asignado a cada rango de la variable considerada, ya sea de manera gráfica (arriba) o mediante texto (abajo)

Finalmente, el usuario puede llevar a cabo una modificación manual de los pesos de evidencia obtenidos automáticamente, pudiendo incorporar conocimiento experto en la explicación del cambio que guía el funcionamiento del modelo (Fig. A.10). En este sentido, Dinamica EGO permite al usuario optar por un enfoque de modelización automático (las relaciones entre variables explicativas y el cambio son establecidas por la propia herramienta de acuerdo con las relaciones estadísticas encontradas entre los datos), experto (las relaciones entre variables explicativas y el cambio son determinadas de acuerdo a criterio humano) o mixto (Mas et al. 2018).

A.2.3. LA SIMULACIÓN A PARTIR DE LAS FUNCIONES *PATCHER* Y *EXPANDER*

Dinamica EGO incorpora en el proceso de simulación y localización del cambio dos funciones distintas, que pueden ser utilizadas conjunta o indistintamente. Se trata del *expander* y del *patcher*. Ambas incorporan un filtro de contigüidad similar al planteado para el caso de CA_Markov, así como un componente estocástico de localización del cambio.

El *expander* simula el cambio de una clase como expansión de la misma. Es decir, los nuevos píxeles simulados son adyacentes o próximos a los ya existentes para tal categoría. Al contrario, la función *patcher* simula los cambios de forma independiente a la localización de los píxeles de la categoría analizada, conformando así nuevos fragmentos de ésta.

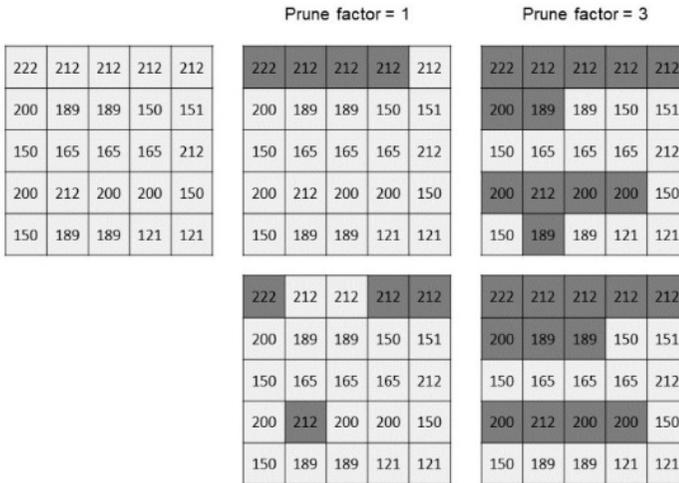
Cuando se utilizan conjuntamente, el modelo primero simula el área de estudio de acuerdo con una función y, a continuación, traslada los mapas de probabilidad modificados, de acuerdo con el cambio que ha tenido lugar, así como las cantidades a simular sobrantes, a la otra función. El usuario puede especificar previamente los porcentajes de las cantidades simuladas asignados a cada función (Fig. A.9). No obstante, si la primera función no es capaz de simular todas las cantidades que le han sido asignadas, estas se transfieren a la segunda función. De acuerdo con la recomendación de los desarrolladores, primero se ejecuta el *expander* y, a continuación, el *patcher* (Soares-Filho et al. 2009). De esta manera, en algunos casos puede que no existan suficientes áreas con potencial de transición anexas a zonas ya ocupadas por tal categoría, por lo que el *expander* no será capaz de simular todo el cambio que el modelo le ha asignado.

El mecanismo estocástico de localización de los cambios para ambas funciones es quizás una de las singularidades de Dinamica EGO, por cuanto es, de los cuatro modelos utilizados en esta tesis, el que incorpora un mayor grado de aleatoriedad en la simulación.

Varias son las formas en la que este componente estocástico participa de la simulación. En primer lugar, el modelo selecciona el conjunto de celdas con el mayor valor de cambio potencial, de acuerdo con las demandas calculadas (Fig. A.11). El *prune factor*, cuyo valor por defecto es 10, multiplica ese número inicial de celdas consideradas. Por tanto, en el caso de contar con 300 celdas a localizar en una transición no urbano-urbano, un *prune factor* de 10 hace que el modelo seleccione las 3000 celdas con mayor valor de cambio potencial. No obstante, el usuario puede decidir qué valor de *prune factor* emplear.

Demanda: 4 celdas

Selección de las celdas candidatas



Selección aleatoria del pixel a evaluar

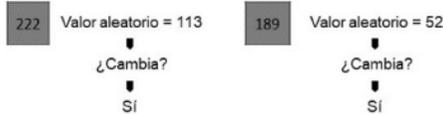


Figura A.11. Representación gráfica de las primeras etapas del proceso de simulación de Dinámica EGO. En primer lugar, se escogen las celdas de mayor cambio potencial, según las demandas del modelo y el valor del prune factor. A continuación, se selecciona una de las celdas anteriores aleatoriamente y se compara su valor con uno aleatorio para decidir si esa celda cambia o no. Fuente: elaboración propia

A menudo, muchas celdas comparten el mismo valor de cambio potencial, representado en una escala de 0 a 255. Por tanto, la selección de un número exacto de celdas suele ser difícil. Si es necesario seleccionar las 300 celdas con el mayor cambio potencial, pero hay 400 celdas con un valor 255, el modelo seleccionará aleatoriamente 300 de ellas. En consecuencia, pese a seleccionar un *prune factor* de 1, es probable que, en dos simulaciones consecutivas, parte de las celdas seleccionadas sean distintas (Fig. A.11).

Una vez se seleccionan las celdas candidatas a cambiar, Dinámica EGO escoge aleatoriamente una de ellas y compara su valor con otro valor aleatorio. Si el valor de la celda es mayor que el aleatorio, esta celda cambia (Fig. A.11). De lo contrario, el proceso se repite y vuelve a seleccionarse una nueva celda. Celdas con valores más altos tienen mayor probabilidad de cambiar que celdas de valores más bajos. La celda seleccionada se convierte entonces en una celda fuente para la expansión o generación de fragmentos (*patches*) de cambio, de acuerdo con la filosofía de las funciones *patcher* y *expander*.

La celda anteriormente seleccionada se utiliza como celda central en la producción del fragmento de cambio, ya sea como expansión de un fragmento existente o como producción de un nuevo fragmento. Sobre esa celda central y en un radio de vecindad (3x3 por defecto, aunque el usuario puede modificar esta), el modelo realiza la selección de nuevas celdas de cambio de acuerdo con el mismo mecanismo arriba explicado: comparación de su valor con uno aleatorio.

Esas celdas que conforman la vecindad del píxel inicialmente elegido no tienen por qué formar parte del conjunto inicial de celdas seleccionadas (demandas**prune factor*) (Fig. A.12). Además, los valores de cambio potencial de las celdas ubicadas en la vecindad del píxel central varían de acuerdo con el valor introducido en el *patch isometry*, que actúa como multiplicador de esos valores de cambio potencial. Un *patch isometry* igual a 1 no varía los valores de cambio potencial, mientras que *patch isometry* menores o mayores disminuyen o incrementan tal valor.

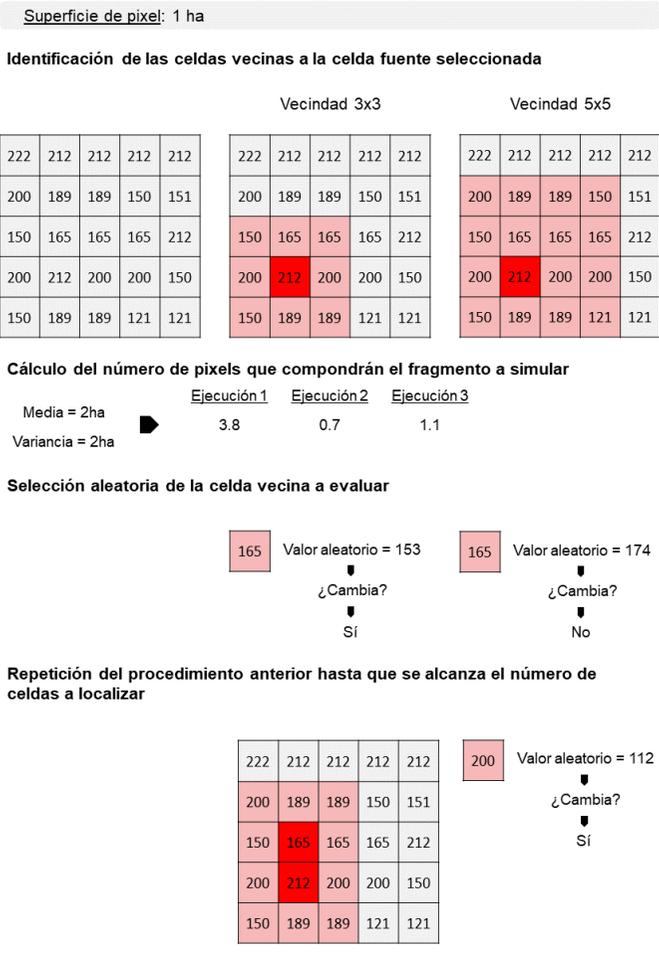


Figura A.12. Representación gráfica del proceso de selección de celdas de cambio a partir del píxel fuente central en Dinámica EGO. Fuente: elaboración propia

La cantidad de cambio localizado en el entorno de la celda fuente inicialmente seleccionada queda determinado por dos valores: la media y la variancia de los fragmentos de cambio definidas por el usuario. El número de celdas concretas a localizar se calcula aleatoriamente a partir de una función de distribución normal, que tiene en cuenta esos valores de media y variancia. Cuanto mayor sea la variancia respecto al dato introducido como media, más grande será la variabilidad en simulaciones consecutivas del número de celdas seleccionadas como expansión de la celda fuente inicial (Tabla A.2).

Tabla A.2. Ejemplo de la variación del número de celdas estimado por el algoritmo de simulación de Dinamica EGO para la formación de nuevos fragmentos de cambio, en función de los parámetros utilizados para la definición del tamaño de los fragmentos de cambio (media y variancia). Los datos han sido obtenidos a partir de la función NORMINV de Excel

	Ejecución 1	Ejecución 2	Ejecución 3	Ejecución 4	Ejecución 5
Media: 1 Variancia: 1	0.966040995	0.782500424	0.678241217	2.179340267	0.599708567
Media: 1 Variancia: 5	4.651044095	-5.273072154	3.094866626	-7.277318467	4.649164131
Media: 1 Variancia: 10	-1.384781299	3.998380428	-12.85455213	-3.016931675	6.497444041
Media: 1 Variancia: 100	-65.48862392	-66.11810648	38.66061336	-86.26776861	96.48091055
Media: 10 Variancia: 1	9.198717907	9.57154196	11.0738269	9.257122069	10.5553507
Media: 10 Variancia: 5	7.280617743	-0.209103889	17.01168098	9.732450205	5.642671132
Media: 10 Variancia: 10	7.898536985	8.102780486	30.39357026	17.92229174	-4.679594677
Media: 10 Variancia: 100	203.356589	38.77724832	-151.4046681	-106.7081736	-97.35575754

A.2.4. VALIDACIÓN Y OPCIONES ADICIONALES

Consecuencia de la gran flexibilidad de su software, Dinamica EGO incorpora un buen número de opciones avanzadas, así como de técnicas de validación. Estas pueden ser además ampliadas por el usuario, a partir de su construcción mediante las herramientas base que proporciona Dinamica EGO, pero también a partir de la vinculación que se ha establecido entre este software y el programa estadístico R (Rodrigues y Soares-Filho 2018).

Algunas de las opciones avanzadas son la posibilidad de regionalizar el ejercicio de modelización, de incluir un efecto de saturación (*saturation effect*) o de limitar que una transición LUCC tenga lugar durante un periodo temporal específico (*sojourn time*) (Soares-Filho et al. 2009). Para el segundo caso, una vez se alcanzado un umbral de superficie para una determinada clase, esta función impide que, aunque existan áreas de gran desarrollo potencial para la misma, esa categoría siga creciendo. La tercera función permite que una transición LUCC específica solo ocurra si ha pasado un determinado intervalo temporal, lo que resulta de especial utilidad para la simulación de algunos procesos naturales como, por ejemplo, la reforestación de un bosque, que requiere de varios años de crecimiento del arbolado.

Entre las técnicas de validación, Dinamica EGO permite la llevar a cabo la mayor parte de los tipos de análisis de validación posibles (Paegelow et al. 2018). Los desarrolladores destacan al respecto la herramienta que permite comparar la similitud entre dos mapas, incorporando la lógica borrosa en la medición de tal similitud, en relación a la distancia (*Reciprocal Similarity Comparison*) (Soares-Filho et al. 2009; Rodrigues y Soares-Filho 2018).

A.3. LAND CHANGE MODELER

Land Change Modeler (LCM) es un modelo desarrollado dentro del software TerrSet, anteriormente IDRISI, y que se plantea como la evolución de CA_Markov. En este sentido, los propios desarrolladores hablan de este último como el precursor de LCM y fomentan su uso sobre el primero, que recomiendan únicamente para fines experimentales (Eastman y Toledano 2018a).

LCM y CA_Markov comparten varias características: el uso de las cadenas de Markov para el cálculo de las cantidades a simular y el algoritmo de localización del cambio (MOLA). Sin embargo, son también numerosas las diferencias. LCM no incorpora la filosofía de los autómatas celulares (CA) y la creación de los mapas de cambio potencial sigue un procedimiento completamente distinto (Mas et al. 2014). Mientras en LCM la creación de estos mapas es completamente automática, en CA_Markov el conocimiento experto juega un papel clave. Por tanto, cabe plantear ambos modelos como complementarios. No se debe así rechazar el uso de CA_Markov, ni plantear su sustitución por LCM.

Land Change Modeler se constituye como un modelo bastante rígido que, por tanto, deja poca flexibilidad al usuario para variar la estructura que se le viene dada por defecto. De hecho, el modelo utiliza los datos con los que se define el ejercicio de modelización como datos de entrada en la mayor parte de sus funciones. Además, cada uno de los resultados generados a lo largo de la simulación, es posteriormente empleado en las sucesivas fases del ejercicio de modelización.

La inclusión de conocimiento experto por parte del usuario en las diferentes fases es limitada. Se refiere a la introducción de los datos necesarios para ejecutar el modelo, así como en relación con los parámetros técnicos que condicionan el funcionamiento de las herramientas estadísticas y automáticas incorporadas en el mismo. Por otro lado, la interfaz gráfica de LCM es bastante intuitiva. Además, la ayuda del software proporciona gran cantidad de información sobre cada una de las fases del ejercicio de modelización.

A continuación, explicamos en detalle cada una de las fases principales de un ejercicio de modelización LUCC con LCM (Fig. A.13).

A.3.1. CÁLCULO DE LAS PROBABILIDADES MARKOVIANAS DEL CAMBIO DE USOS Y COBERTURAS DEL SUELO

LCM también emplea una matriz de probabilidad markoviana para la estimación de las cantidades de cambio a simular. Ésta se calcula a partir de la misma función que la empleada para el caso de CA_Markov. Por tanto, las características técnicas de esta función son las mismas que las apuntadas para ese modelo.

Las probabilidades markovianas son calculadas en LCM de manera automática a partir de los dos mapas LULC introducidos en la fase inicial para llevar a cabo la calibración del modelo. No obstante, el modelo sí permite introducir matrices externas, si bien estas pueden ser únicamente de probabilidades, que no de áreas. Aunque el modelo ha de realizar esa transición desde la matriz de probabilidades Markov a la matriz de áreas, este

paso queda oculto al usuario, que, por tanto, no tiene capaz de modificar esa matriz intermedia.

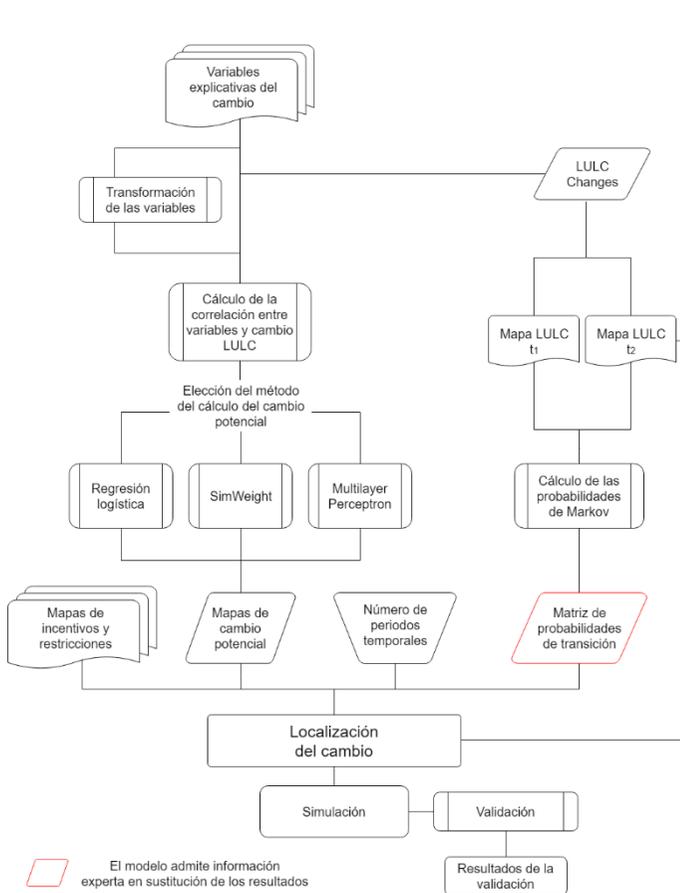


Figura A.13. Esquema del funcionamiento de Land Change Modeler (LCM). Se indica el flujo de trabajo principal para realizar un ejercicio de modelización con este software. No se incluyen, por tanto, opciones avanzadas, que pueden ser utilizadas por el usuario si lo desea. Fuente: elaboración propia

La estructura del modelo y la forma en la que este lleva a cabo la simulación introduce diferencias en las cantidades finalmente simuladas respecto a las que cabe esperar de acuerdo con los resultados de la función MARKOV. De hecho, pese a basarse los dos en ésta, CA_Markov y LCM presentan ciertas diferencias en las cantidades de cambio LULC estimadas (Camacho Olmedo et al. 2015).

A.3.2. EL CÁLCULO AUTOMÁTICO O ESTADÍSTICO DE LOS MAPAS DE CAMBIO POTENCIAL

El usuario puede escoger entre tres métodos distintos para llevar a cabo la creación de los mapas de cambio potencial en LCM. Estos se dividen en un análisis estadístico (regresión logística (LR)) y dos análisis basados en la inteligencia artificial (*Multi-Layer Perceptron neural network* (MLP) y SimWeight). En el futuro se prevé la incorporación de dos

nuevos procedimientos de calibración del modelo, basados también en la inteligencia artificial: *Weighted Normalized Likelihoods* y una *Support Vector Machine* (Eastman y Toledano 2018b).

Al igual que en Dinámica EGO, estos métodos evalúan la relación entre una serie de variables que explican el cambio LULC y otro conjunto de mapas mostrando cada tipo de cambio LULC que ocurre, es decir, cada transición de una categoría LULC a otra (ej. de no urbano a urbano). De este modo, se evalúa aquí la probabilidad de que un tipo de cambio se pueda efectuar, en vez de la potencialidad para que se localice en el área de estudio un determinado tipo de uso o cobertura.

El usuario puede simular tantas transiciones de cambio como desee. Desde una única, hasta el conjunto de todas las transiciones posibles entre las diferentes categorías que componen los mapas LULC empleados. Para los métodos de regresión logística y SimWeight, se debe de calcular un mapa de cambio potencial para cada transición considerada, mientras que en MLP se pueden agrupar transiciones en un único mapa de cambio potencial, siempre que queden explicadas por las mismas variables independientes (Eastman 2015).

La regresión logística es considerada, de los tres métodos, el que ofrece peores resultados (Eastman 2015) y, en este sentido, los desarrolladores han planteado su inclusión únicamente con fines pedagógicos (Eastman y Toledano 2018b). Contiene una limitación respecto a los otros dos métodos. Requiere que las variables que explican el cambio se encuentren relacionadas linealmente con éste (Eastman 2015) y que no se encuentren correlacionadas entre sí (Mas et al. 2014). LCM ofrece una herramienta de transformación de estas variables que ofrece una solución al primer problema (Fig. A.14).

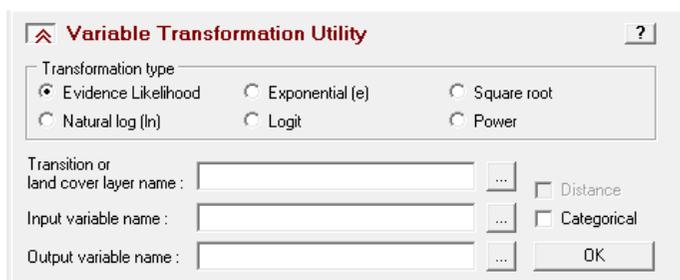


Figura A.14. Herramienta de transformación de las variables que explican el cambio facilitada como parte del modelo LCM

Por su parte, los métodos basados en la inteligencia artificial poseen un comportamiento similar. A partir de una muestra de la variable dependiente, que en este caso se corresponde con el cambio LULC evaluado, se determina la relación entre las variables que explican el cambio (independientes) con la variable dependiente (cambio LULC). Tal relación es posteriormente validada con la muestra que no se ha utilizado para el análisis anterior.

El usuario puede decidir algunos de los parámetros técnicos que gobiernan el funcionamiento de estos métodos. En ambos casos, se puede decidir el tamaño de la muestra empleada, lo que es especialmente significativo en el caso de cambios que afecten a áreas

muy concretas y en los que, por tanto, la selección de la proporción por defecto puede incorporar parcialidades en el análisis. En SimWeight el usuario puede establecer también el valor de la variable k , que determina el grado de generalidad de la solución encontrada. Un k muy bajo conduce a un sobreajuste de la solución encontrada. Al contrario, un k muy alto deriva en una sobregeneralización de la misma (Eastman 2015).

En MLP el usuario puede decidir sobre un mayor número de parámetros, si bien los desarrolladores sostienen que no es necesario modificar la mayor parte de los mismos, ni incluso comprenderlos, para lograr un buen resultado (Eastman 2015). De hecho, este método va automáticamente modificando los parámetros, a medida que aprende sobre la estructura y características de los datos analizados. De este modo, esta herramienta imita el comportamiento neuronal de un cerebro humano. Los desarrolladores recomiendan su utilización, al considerarlo el método más maduro de los tres implementados en el modelo (Eastman y Toledano 2018b).

El usuario puede encontrar una detallada descripción del significado de cada parámetro de la función MLP en la ayuda del modelo. Además, Taud y Mas (2018) proporcionan una breve y didáctica introducción a este método.

Finalmente, los tres métodos necesitan de variables de tipo continuo. En el caso de que sean categóricas, estas deben de ser transformadas, para lo que se puede utilizar la herramienta de transformación de las variables anteriormente mencionada (Fig. A.14). LCM también proporciona al usuario la posibilidad de realizar un test Cramer's V para medir la correlación entre las variables consideradas y la transición LULC considerada (Fig. A.13), a fin de conocer de manera previa el posible poder explicativo de cada variable.

A.3.3. LA LOCALIZACIÓN DEL CAMBIO

Al igual que CA_Markov, LCM emplea MOLA como algoritmo de localización del cambio. Este puede ser aplicado en una única ocasión, en el caso de que solo se considere un único periodo temporal (*recalculation stage*) en la simulación, o bien en varias ocasiones si se consideran varios periodos temporales, como en el caso de CA_Markov. La primera opción suele ser habitual en aquellas ocasiones en las que no se hace uso de variables de tipo dinámico.

En el periodo de simulación de LCM el usuario puede definir una serie de incentivos y restricciones, en forma de mapas, que actúan como multiplicador de los mapas de cambio potencial creados en el paso anterior. De este modo, el usuario puede restringir el cambio en ciertas áreas, independientemente de su potencial de transición.

A.3.4. VALIDACIÓN Y OPCIONES ADICIONALES

LCM incorpora un método de validación que compara el mapa simulado con el mapa inicial utilizado para el ejercicio de modelización y un mapa de referencia para la fecha de la simulación. Mediante la tabulación cruzada de los tres, el modelo proporciona un mapa

que distingue entre aciertos (*hits*), cambios que no fueron predichos por el modelo (*misses*) y cambios predichos que, sin embargo, no ocurrieron en la realidad (*false alarms*).

El usuario puede hacer uso también del conjunto de herramientas de validación incorporadas como parte del software TerrSet y ya comentadas en el apartado referido a CA_Markov.

Finalmente, LCM incluye ciertas opciones avanzadas de interés, como la posibilidad de llevar a cabo la simulación de la red de carreteras, así como de aplicar cambios previstos en las infraestructuras durante el periodo de simulación. Además, incorpora una ventana específica de análisis para calcular la reducción estimada de emisiones de gases efecto invernadero en relación con los cambios LULC simulados por el modelo. Entre los análisis iniciales, el modelo proporciona también una interfaz gráfica muy sencilla e intuitiva para llevar a cabo la caracterización de los cambios LULC del área de estudio.

A.4. METRONAMICA

Metronamica es un modelo LUCC basado en autómatas celulares, cuyo comportamiento se encuentra limitado por un conjunto de factores socioeconómicos y medioambientales, como la accesibilidad, la idoneidad física del terreno o los instrumentos de planificación. En este sentido, en inglés se define como un *constrained cellular-automata model* (Van Vliet et al. 2013).

Se basa en las teorías desarrolladas por White y Engelen (1993, 1997) y White et al. (1997). Éstas han dado lugar a la generación de modelos similares e incluso idénticos a Metronamica, que Escobar (2018) ha definido de forma genérica como los modelos NASZ, en relación a los componentes que definen los mismos (*neighbourhood, accessibility, suitability* y *zoning*).

Metronamica se encuentra implementado en el software Geonamica, que permite la combinación de este modelo LUCC con otro conjunto de herramientas de modelización de diferente propósito y detalle (Van Delden y Vanhout 2018). En este sentido, a partir de Geonamica, y utilizando Metronamica como modelo base, se han desarrollado un buen número de modelos integrados con diferentes propósitos, que operan en distintos campos temáticos y a diferentes escalas (Fig. A.15). Van Delden et al. (2011) llevan a cabo una revisión de algunas de estas aplicaciones.

Metronamica puede considerarse en sí mismo como un modelo integrado. En este sentido, si bien su versión más simple (el modelo local) queda únicamente compuesta por el modelo LUCC de autómatas celulares anteriormente apuntado, el software incluye dos modelos extras: un modelo regional, que simula la evolución de la población y actividad entre distintas regiones, para determinar posteriormente los cambios LUCC a localizar en el modelo local; y un modelo de transporte, que añade al modelo regional información detallada sobre los flujos de movimiento de personas y actividades.

Para la realización de esta tesis, tan sólo hemos hecho uso del modelo local (Fig. A.16). Este es, por tanto, el que explicaremos en las siguientes líneas en profundidad. Para una

detallada comprensión de las características y funcionamiento de los otros dos modelos se puede recurrir a la documentación oficial de Metronamica (RIKS 2012).

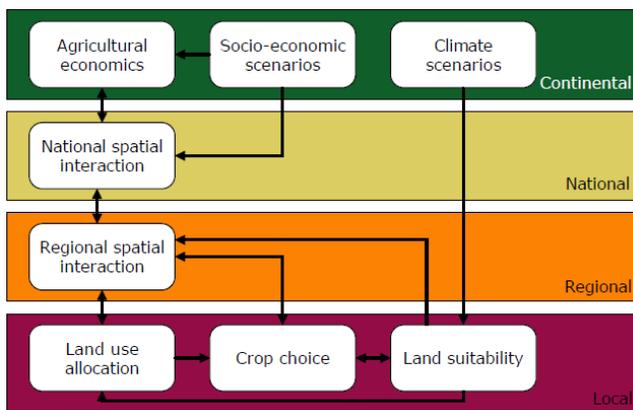


Figura A.15. Ejemplo de modelo integrado (LUMOCAP PSS) desarrollado como parte de Geonamica y que integra Metronamica, a través de los módulos Land use allocation (modelo local, de autómatas celulares) y Regional spatial interaction (modelo regional). Fuente: Van Delden et al. (2011)

A diferencia del resto de modelos, Metronamica distingue en el ejercicio de modelización entre tres tipos de clases: clases modeladas de manera activa (*functions*), clases modeladas de manera pasiva (*vacants*) y clases que permanecen invariables y que, por tanto, no son modeladas (*features*). A continuación, se detallan los pasos fundamentales en la calibración y ejecución de este modelo.

A.4.1. DEFINICIÓN DE LAS CANTIDADES A SIMULAR

El modelo local de Metronamica no incluye ningún mecanismo para llevar a cabo la estimación de las cantidades de cambio. Es el usuario el que debe de introducir manualmente estas (Fig. A.16), ya sea a partir de su propio criterio o bien utilizando procedimientos ajenos a este modelo. Las cantidades se indican en píxeles.

En el caso de utilizar los otros dos modelos que integran Metronamica (regional y de transporte), se pueden calcular las demandas de cambio a partir de la evolución de la población y actividad en el área modelizada. Ya sea por la mera interacción simple entre las distintas regiones en las que cabe dividir el área de estudio, o bien como consecuencia de la simulación de los traslados de población y actividad definidos por el modelo de transporte.

A.4.2. CREACIÓN DE LOS MAPAS DE CAMBIO POTENCIAL

Para Metronamica, la localización del cambio LULC se realiza de acuerdo con la información suministrada por una serie de variables, que se pueden agrupar en cuatro categorías: relaciones de vecindad entre unos usos y otros, que Van Delden y Vanhout (2018) definen como el comportamiento humano, en tanto indica las preferencias de varios actores por la localización de un determinado uso en función de la posición que ocupa el

resto; la accesibilidad, usualmente proporcionada por las vías de comunicación; la idoneidad física del terreno, en relación a características naturales del territorio analizado que influyen en la localización de la actividad modelizada; y las políticas de planificación, vinculadas a aquellos planes de ordenación o calificación del suelo que facilitan o restringen la ubicación de determinados usos en ciertas partes del territorio.

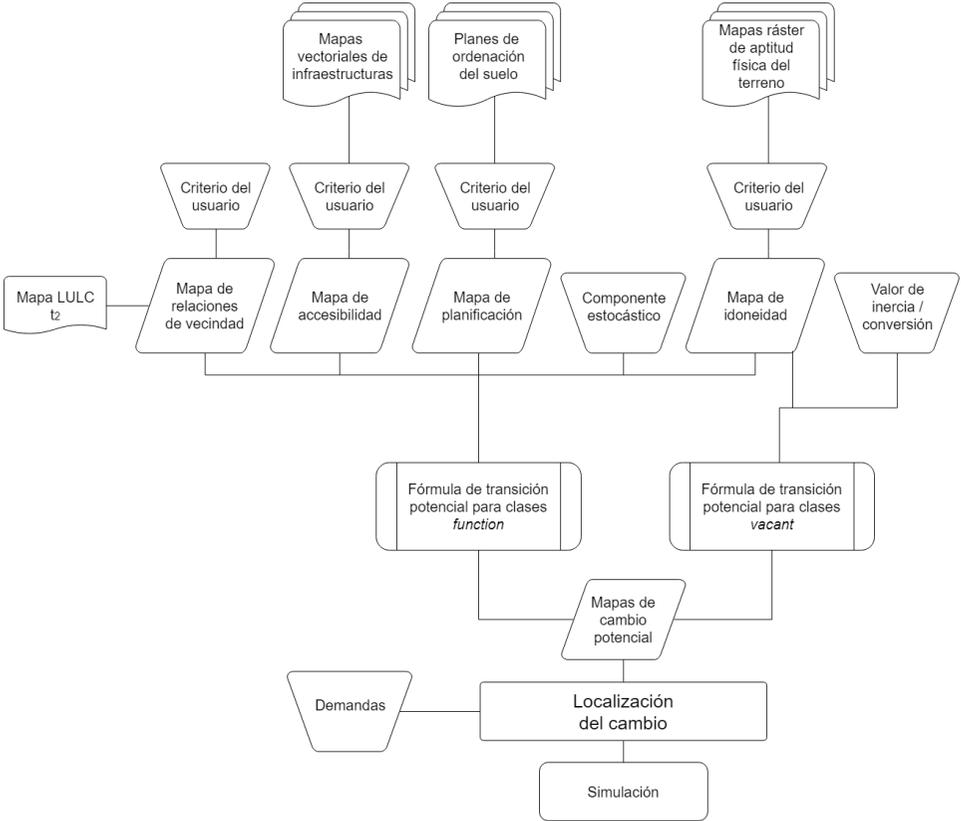


Figura A.16. Esquema del funcionamiento del modelo local de Metronamica. No se representan algunas de las opciones avanzadas de este modelo, como la generación de escenarios o indicadores. Tampoco el total de los parámetros que el usuario debe de especificar para crear cada variable que conforma el mapa de cambio potencial. Fuente: elaboración propia

Se trata así de un enfoque bastante restringido, en tanto no ofrece al usuario la posibilidad de introducir tantas variables como desee. Sin embargo, sí se puede jugar con cada una de las categorías apuntadas, introduciendo en ellas las variables que se considere, aunque no tengan una relación directa con el propósito arriba apuntado. No obstante, en función de la categoría seleccionada, la influencia de las variables consideradas en la creación del mapa de cambio potencial final es distinta.

El conjunto de las variables consideradas con relación a la accesibilidad, dan lugar a la creación de un mapa de potencial en el que los valores se encuentran representados en una escala de 0 a 1, indicando 0 mínima idoneidad al cambio según la accesibilidad y 1

máxima idoneidad. Lo mismo es aplicable para el caso de las variables que conforman la idoneidad física. Al contrario, para las categorías de relaciones de vecindad y políticas de planificación, no existe escala de valores predefinida. Ésta es establecida por el usuario y, por tanto, puede ser infinita. En el caso de considerar para alguno de esos dos grandes tipos de variables valores muy altos (ej. superiores a 10 o 20), los efectos que sobre los mapas de cambio potencial ejercerán las variables agrupadas dentro de la accesibilidad e idoneidad física serán mucho menos significativos, al quedar eclipsados por los valores del conjunto de las relaciones de vecindad o por los planes de ordenación y planificación del suelo.

Cada uno de los grupos de variables arriba apuntados es definido para todas las categorías *function* de manera individual. En el caso de las clases *vacant*, su simulación se realiza únicamente en base a la idoneidad física del terreno. Esto impone ciertas limitaciones en la simulación de estas clases, al ser muy pobre el rango de factores considerados en la explicación de su cambio (Van Delden et al. 2011).

Es en el conjunto de relaciones de vecindad donde opera el componente de autómatas celulares de Metronamica. El usuario puede definir aquí las relaciones de atracción o repulsión entre cada categoría que compone el mapa LULC empleado en el ejercicio de modelización y cada una de las clases *function* (Fig. A.17). Esta información es únicamente introducida de acuerdo con el conocimiento experto, si bien el usuario puede ayudarse en la definición de estos parámetros de un buen número de técnicas como, por ejemplo, el *enrichment factor* (Verburg et al. 2004).

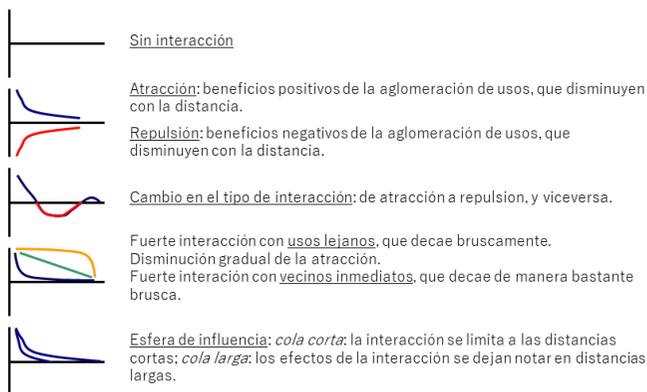


Figura A.17. Relación de los principales tipos de interacciones que se pueden establecer entre las clases *function* y el resto de clases de los mapas LULC en Metronamica. Fuente: Research Institute for Knowledge Systems (RIKS)

Para la creación de los mapas de accesibilidad e idoneidad física, Metronamica proporciona al usuario un conjunto de herramientas que le permiten llevar a cabo su producción a partir de datos base, como la representación vectorial de las infraestructuras de transporte o los mapas de elevación (Fig. A.18). Del mismo modo, el modelo proporciona también al usuario las herramientas necesarias para asignar a las distintas categorías de los planes de ordenación del suelo un determinado peso, así como de cara a definir la jerarquía entre los mismos.

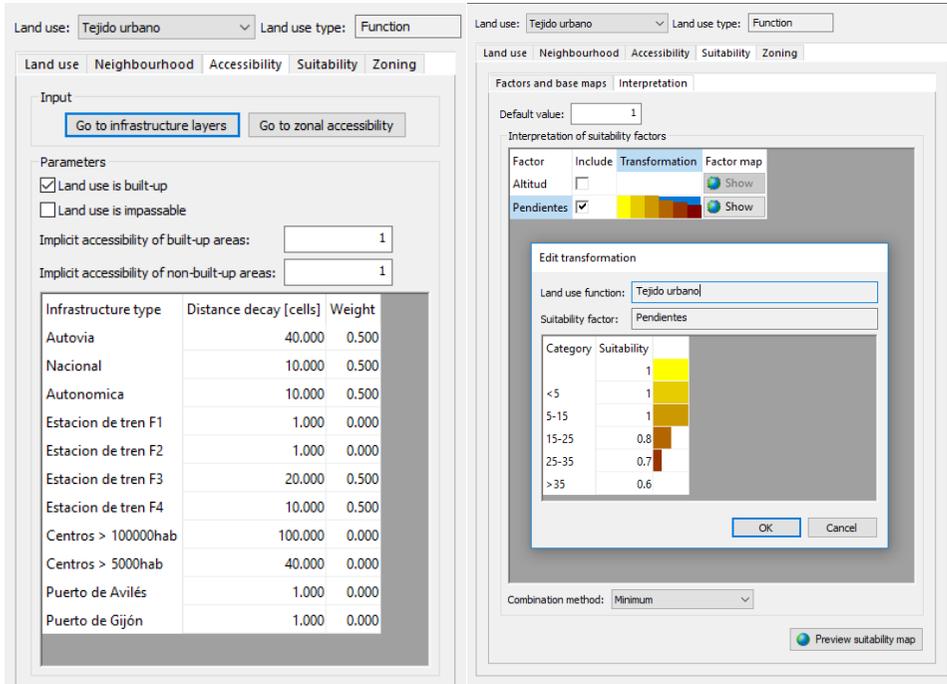


Figura A.18. A la izquierda, herramienta proporcionada por Metronamica para llevar a cabo la creación de los mapas de accesibilidad. El usuario define para cada elemento, lineal o puntual, la distancia, en celdas, sobre la que ejerce su influencia, así como su peso en el conjunto del mapa de accesibilidad final. A la derecha se muestra la herramienta para llevar a cabo la creación de los mapas de idoneidad. El usuario introduce una serie de mapas, los cuales puede reclasificar en categorías, asignando un peso específico a cada una de ellas. Además, el usuario puede definir el método para llevar a cabo la combinación de los diferentes mapas que componen el mapa final de idoneidad

El mapa de cambio potencial final se calcula a partir de los mapas de vecindad, accesibilidad, idoneidad del suelo y planificación, de acuerdo con la fórmula de combinación definida en el modelo, conocida como la *Transition Potential Formula*. Esta es diferente para el caso de las clases *vacant* (1) y para las clases *function* (2).

$${}^tP_{f,c} = {}^tS_{v,c} \cdot I_{v, tLU_c} \quad (1)$$

Dónde ${}^tP_{v,c}$ es el valor del potencial de transición para la clase *vacant* v en la celda c , ${}^tS_{v,c}$ la idoneidad física para la clase *vacant* v en la celda c , y I_{v, tLU_c} el valor de inercia / conversión para la clase *vacant* v en la celda c .

$${}^tV_{f,c} = \begin{cases} {}^tR_{f,c} \cdot (1 + e) & \text{if } \alpha > 0 \\ {}^tR_{f,c} & \text{else} \end{cases}$$

$${}^tP_{f,c} = \begin{cases} {}^tV_{f,c} \cdot {}^tS_{f,c} \cdot {}^tZ_{f,c} \cdot {}^tA_{f,c} & \text{if } {}^tV_{f,c} > 0 \\ {}^tV_{f,c} \cdot (2 - {}^tS_{f,c} \cdot {}^tZ_{f,c} \cdot {}^tA_{f,c}) & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

Donde ${}^tR_{f,c}$ indica el efecto de vecindad (*neighbourhood effect*) para la clase function f en la celda c , α es el componente aleatorio del modelo definido por el usuario (0-1), e el valor obtenido por una distribución Weibull para el cálculo del componente aleatorio, ${}^tS_{f,c}$ la idoneidad física para la clase function f en la celda c , ${}^tZ_{f,c}$ el valor de los planes de ordenación del suelo para la clase function f en la celda c , ${}^tA_{f,c}$ la accesibilidad para la clase function f en la celda c y ${}^tP_{f,c}$ el valor del potencial de transición para la clase function f en la celda c .

Las clases *vacant* se simulan siempre a partir de la multiplicación del valor de inercia / conversión de estas clases por su correspondiente mapa de idoneidad. El valor de inercia / conversión es definido por el usuario de acuerdo con una matriz, en la que se indica la inercia de cada clase *vacant* a permanecer en la misma posición, así como la importancia de la conversión entre esa clase con el resto de clases *vacant* presentes en el ejercicio de modelización (Tabla A.3).

Tabla A.3. Tabla de inercia / conversión para el caso de un modelo con dos clases vacant: áreas de vegetación natural y zonas agrícolas. De acuerdo con la información suministrada, las áreas de vegetación natural poseen una inercia total (1), por lo que no se producirá ningún cambio en su posición. Al contrario, la inercia de las zonas agrícolas es menor. Éstas presentan además una ligera tasa de conversión (0.3) hacia las áreas de vegetación natural. En consecuencia, se puede producir una transición agrícola – vegetación natural en el caso de aquellos ámbitos agrícolas que presenten una alta idoneidad del suelo para las áreas de vegetación natural

	Zonas agrícolas	Áreas de vegetación natural
Zonas agrícolas	0.8	0.3
Áreas de vegetación natural	0.1	1

En el caso de las clases *function*, el modelo proporciona una fórmula por defecto (2) que, sin embargo, al contrario que en caso de las clases *vacant*, puede ser modificada por el usuario. Esta fórmula incorpora un componente aleatorio en el cálculo del cambio potencial, a fin de incluir en el modelo las decisiones humanas que no son predecibles y que, por tanto, no pueden ser racionalmente predichas por medio de un modelo (Hewitt et al. 2014). Adquiere valores entre 0 y 1, significando 0 un determinismo total y 1 gran aleatoriedad. El usuario puede definir este valor de acuerdo con su criterio.

A.4.3. LOCALIZACIÓN DEL CAMBIO

Metronamica sigue un procedimiento muy sencillo para llevar a cabo la localización de los usos y coberturas del suelo. A diferencia de los otros modelos, en cada periodo tem-

poral del ejercicio de modelización (*time step*), Metronamica localiza todas las celdas correspondientes a cada uso o cobertura del suelo modelizada. No localiza únicamente los cambios, sino toda la superficie asignada a cada clase *function* y *vacant*.

Primero se localizan todas las clases *function* y, a continuación, en el espacio sobrante, las clases *vacant*. Esta localización se realiza según los valores indicados en los mapas de cambio potencial generados por el modelo. De este modo, se evalúan todos los valores de cambio potencial, asignándose paulatinamente aquellos píxeles que tienen un valor más alto, hasta que se localizan todas las demandas de las clases *function* (Fig. A.19). En el caso de simular un paisaje estable, los píxeles con un valor más alto tenderán a corresponderse con gran parte de los ámbitos en los que cada categoría se encuentra ya localizada.

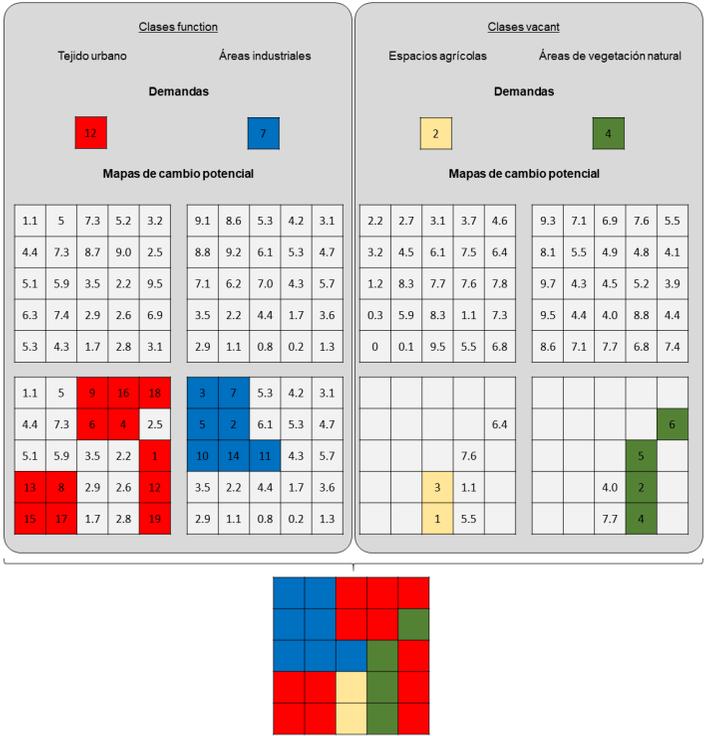


Figura A.19. Representación gráfica del proceso de localización del cambio de Metronamica. Primero se localizan las clases *function*, de acuerdo con sus valores de cambio potencial. Posteriormente, y siguiendo el mismo criterio, se produce la localización de las clases *vacant*. El número de cada píxel localizado indica el orden en el que se ha producido su asignación. Fuente: elaboración propia

A.4.4. VALIDACIÓN Y OPCIONES AVANZADAS

La única forma de validación que se puede realizar dentro del software Metronamica es la tabulación cruzada entre los distintos mapas utilizados como parte del modelo. No obstante, Metronamica se encuentra vinculado a un software específico de validación (Map Comparison Kit), que contiene una gran variedad de técnicas, como las distintas versiones de los estadísticos Kappa o un conjunto métricas espaciales. Permite también llevar a cabo rápidamente y de forma muy sencilla análisis visuales.

Como opciones avanzadas, Metronamica incluye una herramienta para el manejo de distintos escenarios a partir del mismo ejercicio de modelización. También permite la producción de una serie de indicadores socioeconómicos y medioambientales sobre el área de estudio analizada. Estos muestran rápidamente las consecuencias que algunos cambios LULC pueden introducir en el sistema analizado. Finalmente, el modelo proporciona la opción de ejecutar la misma aplicación en numerosas ocasiones, generando un mapa final de probabilidad de cambio. Esto permite comunicar al usuario la incertidumbre que el componente estocástico del modelo intenta simular.

Nota Técnica B

Técnicas y métodos

B.1. AUTOCORRELACIÓN DE MORAN'S I

La autocorrelación de Mooran's I (Moran 1950) es una estadística espacial que permite conocer el grado de autocorrelación de los valores en un mapa ráster. Es decir, nos da información sobre el grado de agrupación o dispersión de los valores en una matriz ráster. En este sentido, sus valores oscilan entre -1 y +1, indicando un resultado negativo la dispersión de los valores que componen la matriz ráster. Al contrario, valores positivos indican la disposición agrupada de los mismos. Frente a otros estadísticos espaciales de autocorrelación, como Geary's C, Mooran's I presenta una mayor sensibilidad global (Bradley et al. 2016).

Se calcula de acuerdo con la ecuación (1)

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (y_i - \bar{y})(y_j - \bar{y})}{(\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2)(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij})} \quad (1)$$

Dónde I es el índice de autocorrelación de Mooran's I, y_i el valor de la celda analizada de la matriz ráster, y_j es el valor de la celda vecina a la celda analizada, n el número de valores y de la matriz ráster analizada, \bar{y} es la media de los valores y y w_{ij} es la proximidad entre las localizaciones i y j .

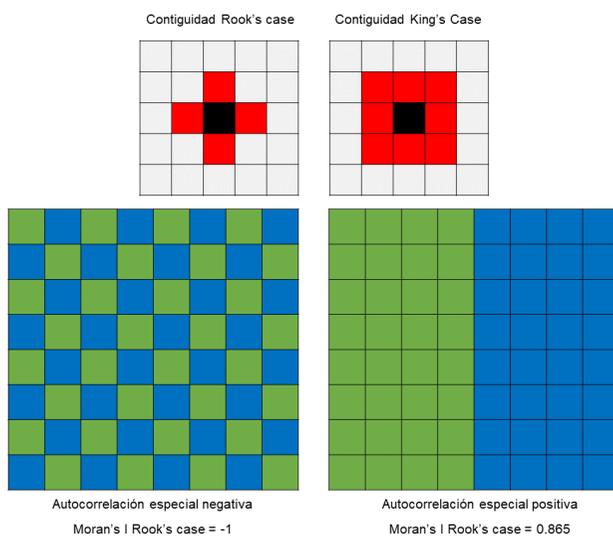


Figura B.1. Arriba, tipos de contigüidad consideradas en el cálculo de Mooran's I. Abajo, ejemplo de autocorrelación Mooran's I con el Rook's Case para un caso teórico en el que las celdas verdes poseen un valor de 1 y las celdas azules un valor de 0. Fuente: basado en Lloyd (2010)

En función de la vecindad considerada a la hora de calcular la correlación Mooran's I, distinguimos entre el Rook's Case, cuando se evalúa la correlación de cada valor con las celdas superior, inferior, izquierda y derecha, y King's Case cuando también se evalúa la correlación respecto a las celdas en la diagonal (Fig. B.1). Según la opción seleccionada, variarán los valores y_j considerados como parte de la vecindad de cada celda de la malla ráster analizada. En el caso de nuestros análisis, hemos optado por el valor de autocorrelación en relación con este segundo caso (King's Case).

B.2. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN O CORRELACIÓN DE PEARSON

Una regresión lineal relaciona una variable dependiente con otra variable independiente, ajustando los valores de la primera de acuerdo con la denominada línea o recta de mejor ajuste (Fig. B.2). De este modo, a través de una regresión lineal, se intenta encontrar la mayor relación posible entre dos fuentes de datos distintas, de tal manera que la mayor parte de sus valores se ajusten a la citada recta. Puede servir en este sentido de modelo predictivo, de tal manera que, dado un valor de la variable independiente, se puede calcular el posible valor que adquiriría la variable dependiente, tomando como referencia los valores que adquiere, en cada posición, la mencionada recta (Lloyd 2010).

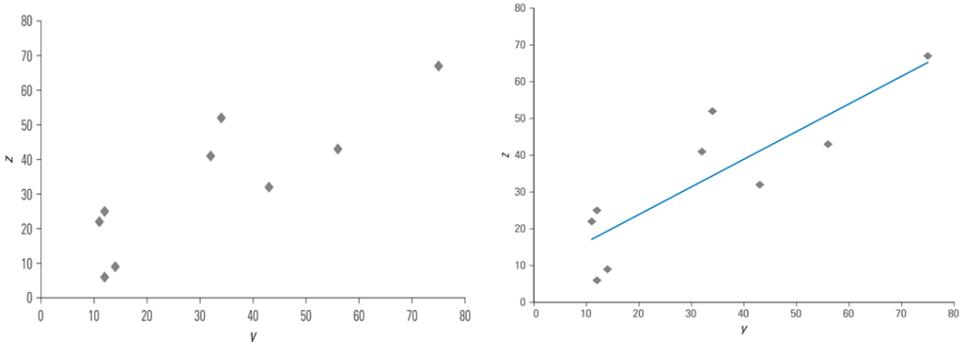


Figura B.2. A la izquierda, representación gráfica de los datos de dos variables: precipitación nivosa (z) y elevación (y). A la derecha, línea de mejor ajuste para los valores de las dos variables evaluadas. Fuente: tomado de Lloyd (2010)

Como resultado de la regresión lineal, se obtiene un coeficiente de correlación, también denominado correlación de Pearson. Es el valor que hemos utilizado en algunos de los análisis de esta tesis para mostrar la correlación existente entre dos variables. Este estadístico muestra la fortaleza de la relación entre las variables evaluadas y es calculado de acuerdo con la ecuación (2). A diferencia de la ecuación de regresión, tan sólo nos muestra la relación o asociación entre dos variables, sin diferenciar entre una dependiente y otra independiente y, por tanto, sin ser útil en términos de predicción (Mukaka 2012).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(z_i - \bar{z})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2}} \quad (2)$$

Dónde r es el coeficiente de correlación, y_i el valor de la celda analizada de la variable dependiente, z_i es el valor de la celda analizada de la variable independiente, n el número de valores y o z , \bar{y} es la media de los valores y y \bar{z} es la media de los valores z .

Adquiere valores entre -1 y +1. Valores positivos indican que las variables analizadas se encuentran positivamente relacionadas, mientras que valores negativos indican lo contrario. Es decir, que las variables se encuentran negativamente correlacionadas.

El coeficiente de correlación de Spearman es más robusto para el análisis de correlación de variables que no presentan una correlación normal (Mukaka 2012). Para el caso de los análisis de esta tesis, estudios test empleando ambos coeficientes de correlación han mostrado información similar para los dos tipos de estadísticos de correlación, con lo que se ha optado por usar el coeficiente de correlación o correlación de Pearson por su fácil y rápido cálculo a través del software TerrSet.

B.3. ESTADÍSTICOS KAPPA

Los estadísticos Kappa son una de las medidas de validación más comúnmente empleadas en un gran campo de disciplinas, entre las que se encuentran la geografía y los análisis espaciales (Hagen 2002). De hecho, es una de las métricas más utilizadas en teledetección. Su uso se encuentra también muy extendido en la Modelización del Cambio de Usos y Coberturas del Suelo (*Land Use Cover Change Modelling*, LUCCM), tal y como revela la revisión realizada por Van Vliet et al. (2016).

Pese a su extendido uso, son muchas las críticas que se han hecho sobre estas métricas. Especialmente en lo relativo a la LUCCM. Pontius Jr. y Millones (2011) y Van Vliet et al. (2011) revisan algunas de ellas.

Entre sus ventajas, cabe mencionar que se trata de una métrica reconocida por la comunidad académica y que, además, no es específica del caso de estudio considerado. Es decir, dos índices Kappa obtenidos a partir de dos análisis distintos, pueden compararse para evaluar qué análisis ha tenido el mejor rendimiento (Van Vliet et al. 2011).

La propuesta del primer índice Kappa realizada por Cohen (1960), denominado por Pontius, Jr. y Millones (2008) como Kstandard, ha sufrido una notable evolución, en la búsqueda de modificaciones que den solución a parte de sus deficiencias. De este modo, Pontius Jr. (2000) propuso cuatro variaciones del índice Kappa: Kstandard, Kno, Klocation y Kquantity. Hagen (2002), por su parte, dividió el índice Kappa en dos componentes (Khistogram y Klocation), de cuyo producto se obtiene el índice Kappa inicialmente propuesto por Cohen (1960). Más tarde, Van Vliet et al. (2011) propusieron una variación del índice Kappa para la LUCCM (Ksimulation), de tal manera que el índice evaluase el acuerdo entre dos mapas, teniendo en cuenta los cambios que en ellos ocurren respecto

a otro mapa de referencia, y sin dar gran peso a la persistencia. Anteriormente, Hagen (2003) había propuesto otra variación del índice Kappa (Fuzzy Kappa), aplicando la lógica borrosa al cálculo de la métrica. Basándose en esta última propuesta, Van Vliet et al. (2013) presentaron una variación del índice Ksimulation (FuzzyKappaSimulation)

A continuación, se detallan el fundamento y características de los índices Kappa utilizados en la realización de esta tesis.

B.3.1. KAPPA

El estadístico Kappa fue inicialmente propuesto por Cohen (1960), si bien Pontius Jr. (2000) y Van Vliet et al. (2011) aportan pruebas de su posible origen anterior. En términos simples, este índice expresa el acuerdo entre dos mapas categóricos, corregido por el acuerdo que es esperado al azar.

Su principal limitación deriva de que, para el cálculo de tal acuerdo, tan sólo tiene en cuenta las proporciones de las categorías en los dos mapas, es decir, sus cantidades (Tabla B.1) (Pontius Jr. 2000; Pontius, Jr. y Millones 2008). De este modo, no incluye información sobre la localización de las mismas. El índice Kappa compara así el acuerdo observado entre dos mapas frente al acuerdo esperado al azar entre los mismos. Este último se obtiene a partir de un modelo estocástico en el que cada píxel cuenta con un valor de ocurrencia de cada categoría, determinado según la proporción o frecuencia de esa categoría en los mapas de origen. Es decir, determinado únicamente en función de las cantidades de cada categoría en los mapas de origen.

Tabla B.1. Matriz de tabulación cruzada utilizada para el cálculo del estadístico Kappa.

$p(a = 1 \wedge s = 1)$ indica la proporción de celdas que pertenecen a la categoría 1 en el mapa A y a la categoría 1 en el mapa S. Los totales en las filas y las columnas ($p(s = 1)$ y $p(a = 1)$) indican la proporción de celdas que pertenecen en cada mapa (A o S) a cada categoría. Basado en Van Vliet et al. (2011)

	Categorías mapa S			c	Total mapa A
Categorías mapa A	1	2	...		
1	$p(a = 1 \wedge s = 1)$	$p(a = 1 \wedge s = 2)$...	$p(a = 1 \wedge s = c)$	$p(a = 1)$
2	$p(a = 2 \wedge s = 1)$	$p(a = 2 \wedge s = 2)$...	$p(a = 2 \wedge s = c)$	$p(a = 2)$
...			
c	$p(a = c \wedge s = 1)$	$p(a = c \wedge s = 2)$			
Total mapa S	$p(s = 1)$	$p(s = 2)$			

Trasladando lo anterior al campo matemático, el índice Kappa tiene en cuenta la proporción de acuerdo para cada categoría en los mapas comparados (3) y compara esta con las esperadas proporciones de acuerdo entre los dos mapas, dada la distribución de sus categorías (4). Es decir, se compara la proporción que supone la persistencia en los dos mapas con el modelo estocástico usado como referencia y calculado según la ecuación (4). En conjunto, el Kstandard se calcula, a partir de los dos elementos anteriores, de acuerdo con la ecuación (5), donde p_0 se refiere a la proporción de acuerdo observada y p_e a la proporción de acuerdo esperada, dada la distribución de las proporciones de las clases.

$$p_0 = \sum_{i=1}^c p(a = i \wedge s = i) \quad (3)$$

$$p_e = \sum_{i=1}^c p(a = i) \cdot p(s = i) \quad (4)$$

$$Kappa = \frac{p_0 - p_e}{1 - p_e} \quad (5)$$

El valor del índice Kappa varía entre 1, indicando un acuerdo perfecto entre los dos mapas comparados, y -1, indicando desacuerdo total entre los dos mapas comparados. Cuando el valor es igual 0, el acuerdo entre los dos mapas es el mismo al acuerdo que cabe esperar entre dos mapas categóricos de similares características al azar. Landis y Koch (1977) propusieron una interpretación más detallada de los valores del índice Kappa (Tabla B.2).

Tabla B.2. Rangos de interpretación del índice Kappa de acuerdo con lo propuesto por Landis y Koch (1977)

Kappa	Acuerdo
<0	Acuerdo menor que acuerdo aleatorio
0.01 - 0.20	Ligero acuerdo
0.21 - 0.40	Acuerdo justo
0.41 - 0.60	Acuerdo moderado
0.61 - 0.80	Acuerdo sustancial
0.81 - 0.99	Acuerdo casi perfecto

B.3.2. FUZZY KAPPA

Cuando se utiliza el estadístico Kappa estándar para evaluar el acuerdo entre dos mapas, tal acuerdo solo se estudia de una forma binaria: entre un par de píxeles (comparado y referencia) hay acuerdo, o no.

Sin embargo, en la realidad, la valoración del acuerdo entre un mapa y otro utilizado como referencia no suele realizarse de manera tan estricta. Al contrario, para el caso de la LUCCM, se entiende que un cambio localizado en el píxel anejo a aquel que cambia en el mapa de referencia es, en parte, un éxito, en tanto que revela que se ha sabido entender la zona del ámbito de estudio donde tal cambio puede ocurrir. Del mismo modo, para el mismo ejemplo de modelización, no supone el mismo error confundir un cambio de tejido urbano continuo con un cambio de tejido urbano discontinuo que confundir un cambio de tejido urbano continuo con un cambio de tipo de cultivo.

En estos casos, en los que los errores cometidos por nuestra simulación o el mapa que queremos validar pueden ser interpretados en parte como aciertos, hablamos de aciertos o errores parciales.

Hagen (2003) propuso la introducción de estas consideraciones en el estadístico Kappa, a partir de la inclusión de la lógica borrosa en su cálculo. El Fuzzy Kappa (Kfuzzy) por él propuesto calcula el acuerdo entre dos mapas categóricos de acuerdo con la ecuación (6) a partir de la proporción de acuerdo observada p_0 y la proporción de acuerdo esperada $p_{e(fuzzy)}$. A diferencia del Kappa estándar, la proporción de acuerdo esperada en el Fuzzy Kappa considera también la información en píxeles cercanos al considerado, según su distancia (*distance decay function*), y también en relación con su similitud a las otras categorías. Esta última se establece a través de una matriz de similitud de categorías definida por el usuario y en la que se indica el grado de similitud entre cada par de clases.

$$K_{fuzzy} = \frac{p_0 - p_{e(fuzzy)}}{1 - p_{e(fuzzy)}} \quad (6)$$

Para la formulación matemática de la variable $p_{e(fuzzy)}$ consúltese Hagen (2003). El usuario puede decidir algunos de los parámetros utilizados en el cálculo de esta variable, como el tipo de función *distance decay* empleada.

El Kfuzzy puede adquirir valores entre 0 y 1, significando 0 la no existencia de acuerdo y 1 el acuerdo perfecto entre los dos mapas comparados.

B.3.3. KAPPA SIMULATION

Uno de los principales problemas del índice Kappa, especialmente en el ámbito de la modelización, es que éste calcula el acuerdo entre la totalidad de dos mapas categóricos. Para el caso de la LUCCM, la validación del modelo, si bien suele prestar especial atención a los usos y coberturas del suelo que persisten, se centra especialmente en la evaluación de aquellos usos y coberturas que cambian y, más específicamente, en aquellos píxeles que protagonizan este cambio.

En tanto los cambios solo afectan a una pequeña porción del mapa, el índice Kappa no es capaz de proporcionar información acerca de cómo el modelo ha simulado correctamente esos cambios (Olaya 2014). La simulación correcta de la persistencia hace que, en cualquier caso, el índice logrado por una simulación sea muy alto, normalmente mayor a 0.9 sobre 1. Esto puede llevar al caso de que un modelo nulo, es decir, un mapa sin cambio ninguno, muestre un índice kappa muy alto con el mapa de referencia, incluso cuando ni siquiera se ha realizado ninguna simulación (Pontius Jr. et al. 2004a).

Para dar solución a este problema, Van Vliet et al. (2011) propusieron una revisión del índice Kappa, de tal manera que el modelo estocástico utilizado como referencia para el cálculo del este estadístico tuviese en cuenta la información del cambio entre los dos mapas comparados (t_{1r} y t_{1s}) respecto a otro mapa inicial tomado como referencia (t_0).

Mientras la probabilidad de ocurrencia de una categoría en el modelo estocástico del Kappa estándar viene únicamente determinada por las proporciones o frecuencias de esas categorías en los mapas comparados, en el Kappa simulation propuesto por Van Vliet et

al. (2011) se considera que esa probabilidad de ocurrencia depende también de la categoría que, para cada píxel considerado, ocupaba ese lugar en un mapa origen (o).

Para ello, este índice varía la proporción esperada de acuerdo p_e del Kappa normal (4) por la proporción esperada de acuerdo entre dos mapas dado el tamaño y distribución de las transiciones entre las clases consideradas ($p_e(Transition)$). Esta se calcula según la ecuación (7), en la que o hace referencia al mapa de origen utilizado para medir los cambios de los mapas a y s . Por tanto, el Kappa Simulation utiliza para construir el modelo de referencia la proporción de las transiciones o cambios entre pares de clases, en vez la proporción de las clases en sí.

$$p_e(Transition) = \sum_{c=1}^j p(o = j) \cdot \sum_{c=1}^i p(a = i | o = j) \cdot p(s = i | o = j) \quad (7)$$

El valor del Ksimulation adopta el mismo rango de valores que el índice Kappa estándar (-1, 0, 1) y puede ser interpretado de la misma manera. Su cálculo se realiza de acuerdo con la ecuación (8).

$$Ksimulation = \frac{p_0 - p_e(Transition)}{1 - p_e(Transition)} \quad (8)$$

Al centrar su atención en el estudio del acuerdo entre dos mapas en función de los cambios de éstos respecto a otro mapa tomado como referencia, el Kappa Simulation falla a la hora de considerar la persistencia entre los dos mapas comparados. De este modo, en el modelo estocástico tomado como referencia, la persistencia es tan solo considerada como una transición entre clases más, sin tener un peso especial en el conjunto de todas las transiciones consideradas. En consecuencia, una simulación que presenta el doble de cambio del esperado, parte del cual localiza correctamente, puede tener un Kappa Simulation más alto que otra simulación que, simulando el cambio esperado, tan sólo consigue localizar la mitad del cambio localizado correctamente en el caso anterior.

B.3.4. FUZZY KAPPA SIMULATION

Van Vliet et al. (2013) propusieron una variación del Kappa Simulation que incorporase la lógica borrosa, de la misma forma de la que lo hace el Fuzzy Kappa. A través de esta mejora, se puede considerar como acierto parcial aquellos píxeles localizados erróneamente próximos a la celda considerada. También bien aquellos píxeles localizados en ésta, pero definidos a partir de otra categoría cuya transición, sin embargo, tiene un significado similar al de la transición validada.

A diferencia del Kappa estándar, el Kappa Simulation no compara categorías, sino transiciones entre categorías. Por tanto, la aplicación de la lógica borrosa al mismo desde un punto de vista temático, en vez de espacial (distancia), no se realiza a partir de la

similitud entre la clase del píxel comparado y la del píxel de referencia. Al contrario, se efectúa a partir de la similitud entre la transición de ese píxel en el mapa simulado respecto al mapa inicial, con relación a la transición de ese píxel en el mapa de referencia respecto al mapa inicial.

Su cálculo se efectúa a partir de la misma fórmula general que la apuntada para el caso del resto de estadísticos Kappa (5). Sin embargo, las proporciones de acuerdo observada p_0 y esperada p_e se modifican para incorporar el acuerdo parcial consecuencia de la proximidad espacial de la transición medida respecto a la simulada, de acuerdo con una función *distance decay*, o bien por la similitud temática entre la transición medida y la simulada. Van Vliet et al. (2013) desarrollan la formulación matemática de las citadas proporciones de acuerdo en función de las dos variables de pertenencia difusa mencionadas.

B.4. FUZZY NUMERICAL

Se trata de un estadístico desarrollado por el Research Institute for Knowledge Systems (RIKS) e implementado como parte del software de validación Map Comparison Kit (MCK) (Hagen-zanker 2006; RIKS 2010). De este modo, a diferencia de gran parte de los estadísticos y técnicas aquí presentados, no cuenta con un uso extendido.

Su cálculo se basa en una lógica similar a la empleada en la obtención del estadístico Fuzzy Kappa, pero aplicada en este caso al trabajo con variables de tipo continuo, en vez de categórico (Hagen-zanker 2006). De este modo, el estadístico compara los valores de dos mapas de tipo continuo, evaluando su acuerdo en función de la coincidencia de valores idénticos para la misma celda en los dos mapas o, en caso de que esto no sea posible, en las celdas vecinas a la analizada.

En función de la forma en la que el estadístico sea parametrizado para su cálculo, el resultado será diferente. De este modo, el Map Comparison Kit permite decidir el radio de vecindad sobre el que aplicar la lógica borrosa, en la búsqueda de acuerdo entre los dos mapas comparados. También la cantidad de acuerdo asignada entre las dos celdas, en función de la distancia a la que se encuentre la celda que esté de acuerdo con la comparada (RIKS 2010). Siguiendo el método por defecto, que adopta un decaimiento del acuerdo exponencial, si el acuerdo no es logrado en la celda de análisis, cada celda siguiente analizada reducirá a la mitad el valor de acuerdo considerado (ej. 1, 0.5, 0.25, 0.17...).

El Fuzzy Numerical se calcula de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$S_i(A, B) = \max_j^N (f(A_i, B_j) \cdot w(d_{i,j})) \quad (9)$$

$$S_i(A, B) = \min(S_i(A, B), S_i(B, A)) \quad (10)$$

$$S(A, B) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i(A, B) \quad (11)$$

$$f(a, b) = 1 - \frac{|a - b|}{\max(|a|, |b|)} \quad (12)$$

Dónde, $S_i(A, B)$ indica la similitud en una dirección entre el mapa A y el mapa B para la celda i , j hace referencia a las celdas de la vecindad de la celda i , N representa todo el conjunto de celdas que conforman la vecindad de la celda i , $S_i(A, B)$ combina las similitudes en las dos direcciones (mapa A con mapa B y mapa B con mapa A) en una única similitud global, $S(A, B)$ indica la similitud global del mapa, a partir de la media de ésta sobre todas las celdas n del mapa, $f(a, b)$ representa la función que determina la similitud entre dos valores, a y b , y $w(d_{i,j})$ proporciona el peso aplicado a la comparación de los dos celdas comparadas en función de la distancia entre ellas.

B.5. LUCC BUDGET

Paegelow (2018) propone el concepto *LUCC Budget*, que podríamos traducir como el balance de los cambios de usos y coberturas del suelo, para agrupar el conjunto de métricas sobre el cambio entre dos mapas categóricos que se pueden extraer a partir de una matriz de tabulación cruzada (Tabla B.3).

Tabla B.3. Matriz de tabulación cruzada entre dos mapas categóricos, con la relación de métricas que se pueden extraer para interpretar el cambio a partir de la misma. N_{21} hace referencia al número de píxeles que pertenecen a la categoría 2 en t_1 y a la categoría 1 en t_2 . Los valores en la diagonal de la tabla muestran la persistencia entre los dos mapas comparados, es decir, aquellos píxeles que no cambian de categoría entre t_1 y t_2 . Los valores fuera de la diagonal de la tabla muestran los cambios entre los dos mapas comparados, es decir, aquellos píxeles que cambian de categoría entre t_1 y t_2 . N_{+1} hace referencia a la sumatoria del conjunto de cambios en la columna de la categoría 1 menos la persistencia de tal categoría (N_{11}). N_{1+} hace referencia a la sumatoria del conjunto de cambios en la fila de la categoría 1 menos la persistencia de tal categoría (N_{11})

	T ₂				Total t ₂	Pérdida bruta (P _s)
	Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4		
T ₁						
Categoría 1	N ₁₁	N ₁₁	N ₁₃	N ₁₄	N ₁₊	N ₁₊ - N ₁₁
Categoría 2	N ₂₁	N ₂₂	N ₂₃	N ₂₄	N ₂₊	N ₂₊ - N ₂₂
Categoría 3	N ₃₁	N ₃₂	N ₃₃	N ₃₄	N ₃₊	N ₃₊ - N ₃₃
Categoría 4	N ₄₁	N ₄₂	N ₄₃	N ₄₄	N ₄₊	N ₄₊ - N ₄₄
Total t ₁	N ₊₁	N ₊₂	N ₊₃	N ₊₄		
Ganancia bruta (B _s)	N ₊₁ - N ₁₁	N ₊₂ - N ₂₂	N ₊₃ - N ₃₃	N ₊₄ - N ₄₄		
Cambio bruto (C _s)	N ₊₁ + N ₁₊	N ₊₂ + N ₂₊	N ₊₃ + N ₃₊	N ₊₄ + N ₄₊		
Cambio neto (N _s)	N ₊₁ - N ₁₊	N ₊₂ - N ₂₊	N ₊₃ - N ₃₊	N ₊₄ - N ₄₊		
Permuta (S _s)	C ₁ - N ₁	C ₂ - N ₂	C ₃ - N ₃	C ₄ - N ₄		

El LUCC Budget de Paegelow (2018) se basa en los trabajos previamente desarrollados por Pontius Jr. et al. (2004b). Permite diferenciar los siguientes componentes del cambio (Fig. B.3):

- Ganancias brutas (B_s). Conjunto total de ganancias que experimentan una categoría o todas las categorías de un mapa.
- Pérdidas brutas (P_s). Conjunto total de las pérdidas que experimentan una categoría o todas las categorías de un mapa.
- Cambio bruto (C_s). Suma del total de pérdidas y ganancias brutas para una categoría específica o, en el caso de un mapa, para el conjunto de las categorías que lo componen.
- Cambio neto (N_s). Balance resultante de la suma de las ganancias y las pérdidas para una determinada categoría o para el conjunto de categorías de un mapa.
- Permuta (*swap*) (S_s). Diferencia entre el cambio bruto y el cambio neto, que revela el cambio que ocurre como consecuencia de la localización de las categorías, pero sin que se produzca un cambio en las proporciones de éstas.

Además, la utilización de la matriz de tabulación cruzada permite diferenciar entre aquellos píxeles que no cambian (persistencia) y los que sí lo hacen, pudiendo distinguir para este último caso la magnitud del cambio entre pares de categorías.

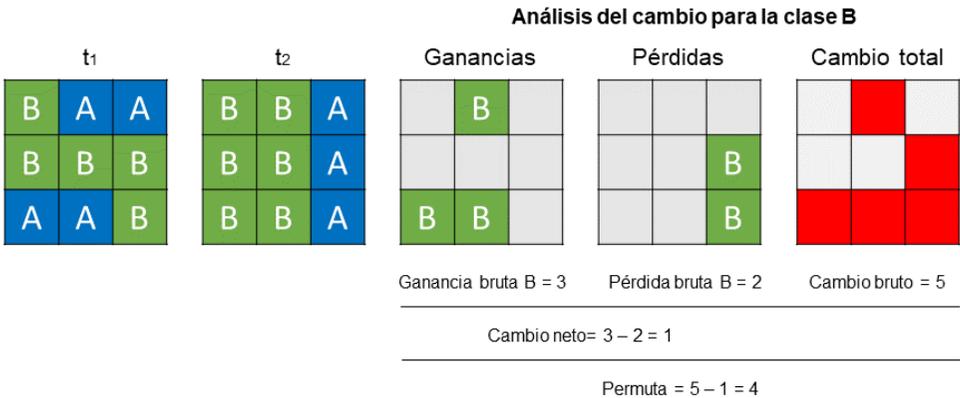


Figura B.3. Componentes del cambio estudiados a través del LUCC Budget para un ejemplo teórico de cambio entre dos mapas categóricos binarios. Fuente: elaboración propia

B.6. LA MATRIZ DE PONTIUS JR.

La Matriz de Pontius Jr. es una hoja de cálculo Excel desarrollada principalmente por Robert Gilmore Pontius Jr, que incluye gran parte de las técnicas de validación propuestas por este investigador en diferentes artículos científicos (Pontius Jr. et al. 2004, 2008; Pontius Jr. y Millones 2011; Aldwaik y Pontius Jr. 2012; Pontius Jr. y Santacruz 2014). Se

encuentra disponible de manera gratuita en la página web <http://www2.clarku.edu/~rpontius/>. La versión más reciente es la 41, publicada en 2014.

La matriz de Pontius Jr. permite realizar, de manera automática, la validación o comparación de mapas categóricos a partir de un buen número de métodos y procedimientos. Entre otros, el desacuerdo en la cantidad y la localización, los componentes *exchange* o *shift* del cambio, la *Figure of Merit* o los análisis de intensidad del cambio. Para iniciar el análisis, tan sólo es necesario introducir la matriz de tabulación cruzada de los dos mapas categóricos comparados (Tabla B.4), que habitualmente se corresponderán con el mapa que queremos validar (ubicado en las filas) y el mapa de referencia (ubicado en las columnas).

Tabla B.4. Diseño de una matriz de tabulación cruzada entre dos mapas categóricos. N_{11} hace referencia al número de píxeles que pertenecen a la categoría 1 en el mapa 1 y a la categoría 1 en el mapa 2

	Mapa 2			
	Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4
Mapa 1				
Categoría 1	N_{11}	N_{12}	N_{13}	N_{14}
Categoría 2	N_{21}	N_{22}	N_{23}	N_{24}
Categoría 3	N_{31}	N_{32}	N_{33}	N_{34}
Categoría 4	N_{41}	N_{42}	N_{43}	N_{44}

Puesto que para la realización de esta tesis doctoral tan sólo hemos hecho uso de algunos de los procedimientos de validación incluidos en esta matriz, desarrollamos a continuación éstos en detalle.

B.6.1. DESACUERDO EN LA CANTIDAD Y LA LOCALIZACIÓN

Debido a los notables problemas asociados al uso de los estadísticos Kappa, en relación con el poder explicativo de éstos, Pontius Jr. y Millones (2011) propusieron un marco teórico de trabajo alternativo a partir de conceptos y procedimientos que, con diferentes nombres, ya habían sido comúnmente utilizados en el campo del análisis espacial. De hecho, el desarrollo de estos conceptos descansa sobre un cálculo tan simple como la fracción correcta de una matriz respecto a otra utilizada como referencia. En términos espaciales, se refiere a los píxeles de un mapa ráster que comparten valor con los píxeles de un ráster utilizado como referencia.

Los conceptos propuestos por Pontius Jr. y Millones (2011) son los siguientes (Fig. B.4):

- Desacuerdo en la cantidad (*quantity disagreement*). Se trata de la cantidad de diferencia en las proporciones de las diferentes categorías entre el mapa de referencia y el mapa comparado.
- Desacuerdo en la localización (*allocation disagreement*) Se trata de la cantidad de diferencia en la localización de las diferentes categorías entre el mapa de referencia y el mapa comparado.

- Omisión (*omission*). Se produce cuando píxeles del mapa comparado (t_2) no se corresponden con la misma categoría en el mapa de referencia (t_1). Cuando se evalúa el cambio entre dos mapas a distintas fechas, se puede entender también como ganancia (*gain*).
- Comisión (*comission*). Se produce cuando píxeles del mapa de referencia (t_1) no se corresponden con la misma categoría en el mapa comparado (t_2). Cuando se evalúa el cambio entre dos mapas a distintas fechas, se puede entender también como pérdida (*loss*).

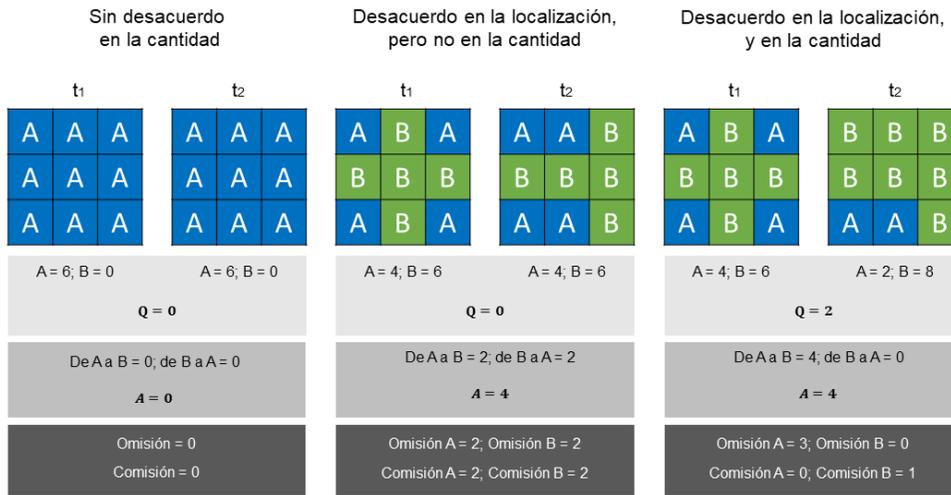


Figura B.4. Desacuerdos en la cantidad y la localización y errores de omisión y comisión para tres ejemplos teóricos de matrices. Fuente: elaboración propia

Las siguientes ecuaciones traducen cuantitativamente los conceptos anteriores. Se trata de los cálculos incorporados en la matriz de Pontius Jr. y que permiten el cálculo automático de los conceptos mencionados. La ecuación (13) calcula el desacuerdo en la cantidad (q_g) para la categoría de ejemplo g . La ecuación (14) calcula el desacuerdo total en la cantidad (Q). La ecuación (15) calcula el desacuerdo en la localización (a_g) para la categoría de ejemplo g . La ecuación (16) calcula el desacuerdo total en la localización (A).

$$q_g = \left| \left(\sum_{i=1}^J p_{ig} \right) - \left(\sum_{j=1}^J p_{gj} \right) \right| \quad (13)$$

$$Q = \frac{\sum_{g=1}^J |(\sum_{i=1}^J p_{ig}) - (\sum_{j=1}^J p_{gj})|}{2} \quad (14)$$

$$a_g = 2 \min \left[\left(\sum_{i=1}^J p_{ig} \right) - p_{gg}, \left(\sum_{j=1}^J p_{gj} \right) - p_{gg} \right] \quad (15)$$

$$A = \frac{\sum_{g=1}^J 2 \min [(\sum_{i=1}^J p_{ig}) - p_{gg}, (\sum_{j=1}^J p_{gj}) - p_{gg}]}{2} \quad (16)$$

Donde, J representa el número de categorías, i es el indicador para una categoría de una fila en la matriz de tabulación cruzada, j es el indicador para una categoría de una columna en la matriz de tabulación cruzada y p_{ig} expresa la proporción estimada del área de estudio que es la categoría i en el mapa comparado y la categoría g en el mapa de referencia.

B.6.2. COMPONENTES DEL DESACUERDO EN LA LOCALIZACIÓN

En el 2014, Pontius Jr. y Santacruz (2014) propusieron la diferenciación del desacuerdo en la localización en dos componentes distintos: *Exchange* y *Shift*, que en castellano podríamos traducir como intercambio y desplazamiento (Fig. B.5). El intercambio (*exchange*) se refiere a los desacuerdos en la localización entre dos categorías que se confunden mutuamente. Al contrario, el desplazamiento (*shift*) se refiere al desacuerdo en la localización de una categoría que se confunde con otra que, a su vez, se confunde con otra distinta. En el primer caso hablamos de desacuerdo entre pares de categorías, mientras en el segundo caso de desacuerdo entre más de dos categorías.

El intercambio (e) y el desplazamiento (s) se calculan para una categoría arbitraria (j) de acuerdo con las ecuaciones (17) y (18), implementadas en la matriz de Pontius Jr. El intercambio (E_t) y desplazamiento total (S_t) se calculan de acuerdo con las ecuaciones (19) y (20).

$$e_{tj} = \sum_{i=1}^J (\varepsilon_{tij} + \varepsilon_{tji}) = \frac{2 \times \{[\sum_{i=1}^J \text{MINIMUM}(C_{tij}, C_{tji})] - C_{tjj}\} \times 100\%}{(Y_{t+1} - Y_t) \times \sum_{i=1}^J \sum_{j=1}^J C_{tij}} \quad (17)$$

$$s_{tj} = \frac{\{[\sum_{i=1}^J (C_{tij} + C_{tji})] - 2 \times C_{tjj}\} \times 100\%}{(Y_{t+1} - Y_t) \times \sum_{i=1}^J \sum_{j=1}^J C_{tij}} - \frac{|\sum_{i=1}^J (C_{tij} - C_{tji})| \times 100\%}{(Y_{t+1} - Y_t) \times \sum_{i=1}^J \sum_{j=1}^J C_{tij}} - e_{tj} \quad (18)$$

$$E_t = \frac{\sum_{j=1}^J e_{tj}}{2} \quad (19)$$

$$S_t = \frac{\sum_{j=1}^J S_{tj}}{2} \quad (20)$$

Donde, C_{tij} es el tamaño de la extensión espacial que representan la fila i y la columna j de la matriz de tabulación cruzada para el periodo de tiempo t , Y_t es el año de inicio del periodo de tiempo t , Y_{t+1} es el último año del periodo de tiempo t , e_{tj} es el componente intercambio para la categoría j para el periodo de tiempo t y s_{tj} es el componente de desplazamiento para la categoría j para el periodo de tiempo t .

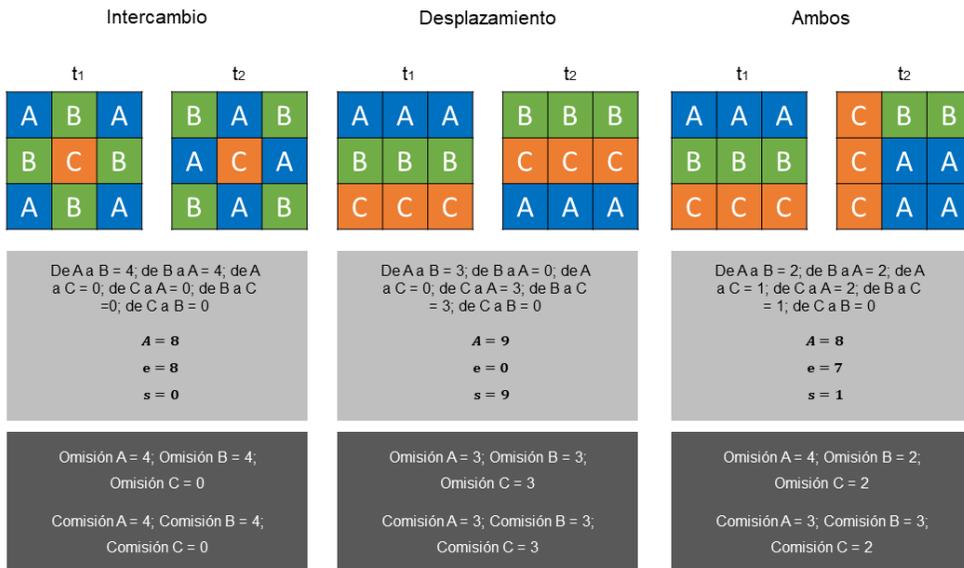


Figura B.5. Desacuerdos en la cantidad, desagregados según los componentes intercambio y desplazamiento, junto a errores de omisión y comisión, para tres ejemplos teóricos de matrices. Fuente: elaboración propia

B.7. MÉTRICAS ESPACIALES

Con el término “métricas espaciales” hacemos referencia al conjunto de índices y métricas desarrollados en el campo de la ecología del paisaje, y cuyo uso ha superado con mucho este marco conceptual. De este modo, para la utilización de las métricas de ecología del paisaje (*landscape metrics*) en otras disciplinas y campos de investigación se prefiere el uso del término “métricas espaciales” (Herold et al. 2005), el utilizado en esta tesis.

B.7.1. LA BASE TEÓRICA DE LAS MÉTRICAS ESPACIALES. SU ORIGEN EN LA ECOLOGÍA DEL PAISAJE

Las métricas espaciales tienen su origen en los análisis cuantitativos desarrollados por la ecología del paisaje. Esta disciplina nace en la segunda mitad del siglo XX, a partir de la

unión de conceptos propios de la ecología (enfoque funcional) y de la geografía (enfoque espacial), para llevar a cabo un estudio del paisaje desde una perspectiva holística, centrandó su atención en el análisis de los procesos que operan sobre el mismo, y que determinan la aparición de unos patrones paisajísticos específicos (Turner y Gardner 2015). La ecología del paisaje estudia así la relación entre esos patrones y procesos, conceptualizando para ello el paisaje desde el punto de vista de la heterogeneidad. Heterogeneidad horizontal, en relación con la variación y distribución de los paisajes a lo largo del territorio; y heterogeneidad vertical, en íntima relación con el concepto de escala y de nivel de organización, que hace así referencia a la específica interrelación de los elementos bióticos y abióticos que se produce para una determinada porción del paisaje, a un nivel de análisis concreto (Vila i Subirós et al. 2006).

Las métricas espaciales, o métricas de la ecología del paisaje (*landscape metrics*), permiten llevar a cabo el estudio cuantitativo de esos patrones paisajísticos, a partir de los cuales poder inferir los procesos que los originan. Este cálculo opera sobre una conceptualización del espacio o del paisaje a partir de tres elementos fundamentales: el fragmento o tesela (*patch*), los corredores (*corridors*) y, fruto de los dos anteriores, la matriz (*matrix*) (Botequilha Leitao et al. 2006).

El fragmento o tesela (*patch*) puede definirse como un área no lineal, relativamente homogénea de acuerdo con una propiedad específica del paisaje, y que se diferencia de su entorno (Herold et al. 2005). De este modo, en función del criterio utilizado y el objetivo de estudio, los fragmentos o teselas de un paisaje serán diferentes. Un corredor (*corridor*) es un área lineal de un tipo de cubierta del suelo específica que se diferencia en su contenido y estructura física de su entorno (Botequilha Leitao et al. 2006; Turner y Gardner 2015). Por su carácter lineal, sirve de elemento de conectividad entre unos fragmentos y otros, en relación con la concepción funcional de la ecología del paisaje (Vila i Subirós et al. 2006). Finalmente, la matriz es el tipo de cubierta del suelo dominante en extensión, grado de conectividad y continuidad, así como aquella que posee un control general sobre el paisaje analizado (Botequilha Leitao et al. 2006; Turner y Gardner 2015). Vila i Subirós et al. (2006) sustituyen esta concepción funcional de la matriz, para pasar a definirla a partir de sus elementos constituyentes. Bajo tales criterios, una matriz no es más que el complejo formado por fragmentos y corredores.

Para el caso de los propósitos de esta tesis, en la que pretendemos estudiar el patrón paisajístico desde un punto de vista únicamente espacial, sin atender al enfoque funcional, nos centramos en la conceptualización de ese paisaje únicamente a partir de fragmentos o teselas (*patches*). La formulación de estos sobre datos espaciales merece una especial consideración, en tanto según la forma en la que los fragmentos sean entendidos, las métricas espaciales pueden mostrar distintos resultados.

En el caso de datos de tipo ráster, los utilizados para el cálculo de las métricas espaciales en esta tesis, los fragmentos o teselas pueden quedar definidos de acuerdo con dos reglas distintas: regla de vecindad de cuatro celdas o regla de vecindad de ocho celdas (Fig. B.6) (Turner y Gardner 2015). De acuerdo con la primera, sólo se consideran como

parte de un mismo fragmento aquellas celdas que poseen las mismas propiedades que sus vecinas en los ejes horizontal y vertical. Siguiendo la segunda regla, las celdas vecinas con las mismas propiedades que la analizada que se encuentran en el eje diagonal, también se consideran parte del mismo fragmento o tesela. Para nuestra tesis, hemos optado siempre por una vecindad de 8 celdas, por considerarla más próxima a la correcta conceptualización del espacio de acuerdo con los fines de nuestros análisis.

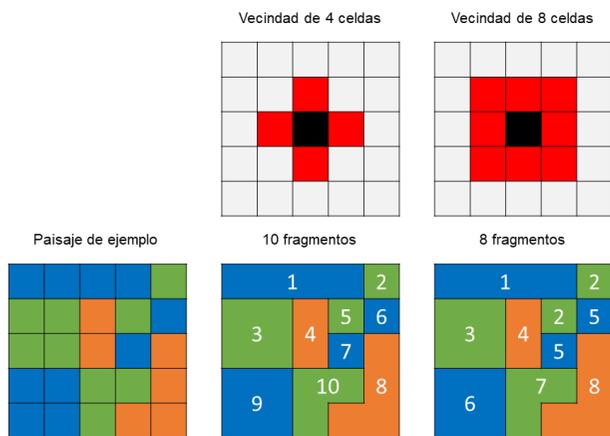


Figura B.6. Diferente delimitación de fragmentos del mismo paisaje, según la regla utilizada para la definición de los mismos. Fuente: elaboración propia

El análisis cuantitativo de las métricas espaciales o del paisaje se puede llevar a cabo a tres niveles diferentes: a nivel de fragmento, a nivel de clase (según el criterio que diferencie unos fragmentos de otros) o a nivel de paisaje (Botequilha Leitao et al. 2006). En el primer caso, los índices son aplicados a cada fragmento individualmente. En el segundo, se obtienen las métricas para el conjunto de fragmentos de la misma clase, mientras que en el último nivel (paisaje), los cálculos se realizan para todo el conjunto de fragmentos que integran el paisaje, independientemente de su clase (Vila i Subirós et al. 2006).

En esta tesis, hemos calculado las métricas espaciales únicamente a nivel de clase, por ser el más significativo y útil de cara a los objetivos de nuestros análisis.

B.7.2. LAS MÉTRICAS ESPACIALES COMO HERRAMIENTA PARA EL ESTUDIO DE LAS RELACIONES ESCALARES Y LA CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE MODELOS DEL CAMBIO DE USOS Y COBERTURAS DEL SUELO

Las métricas espaciales han sido aplicadas en una gran variedad de estudios con diferente propósito. Entre ellos, podemos mencionar el estudio escalar de la realidad geográfica o la calibración y validación de modelos del Cambio de Usos y Coberturas del Suelo (*Land Use Land Cover Change*, LUCC).

En relación al primer punto, se ha reconocido en numerosas ocasiones la dependencia escalar de las métricas espaciales (Li y Wu 2004; Gergel 2007; Turner y Gardner 2015).

En función de la resolución o extensión del área analizada, las métricas dan lugar a resultados distintos. De hecho, parte de la ecología del paisaje se ha destinado a estudiar los efectos de los distintos componentes de la escala en el cálculo de las métricas espaciales, existiendo una amplia y profusa literatura al respecto, la cual revisan Šímová y Gdulová (2012).

Las métricas espaciales son así una herramienta de gran utilidad para el estudio de los cambios introducidos por la escala en el patrón de los datos espaciales analizados y, más concretamente, en su composición (proporciones de las clases en el mapa) y configuración (distribución espacial de las clases en el mapa). De hecho, son numerosos los estudios que han analizado la variación de los datos estudiados en función de la escala de análisis escogida (Wu 2004; Aguilera-Benavente et al. 2014; Frazier y Kedron 2016).

Por otro lado, en el caso de la modelización LUCC, las métricas espaciales han sido comúnmente utilizadas como herramienta de calibración y validación de los modelos, de cara a medir la precisión con la que el patrón ha sido simulado (Bradley et al. 2016; Van Vliet et al. 2016). Son así una de las principales herramientas para llevar a cabo la evaluación de tal aspecto del proceso de modelización.

La doble utilidad de las métricas espaciales, tanto para el análisis de los efectos de la escala en los estudios geoespaciales, como para la calibración y validación de modelos LUCC, ha sido la principal razón de su inclusión como uno de los métodos principales utilizados en los análisis cuantitativos que acompañan esta tesis.

B.7.3. LA OFERTA DE MÉTRICAS ESPACIALES. TIPOS DE MÉTRICAS Y RELACIÓN DE ÍNDICES SELECCIONADOS

Desde la aparición de la ecología del paisaje, y el estudio cuantitativo del mismo a partir de las métricas o índices del paisaje, se ha producido el desarrollo de un innumerable número de métricas (Botequilha Leitao et al. 2006). La mayor parte de estas se encuentran correlacionadas, proporcionando información muy similar (Gergel 2007), con lo que su selección se hace difícil (Aguilera-Benavente et al. 2011; Van Vliet et al. 2016).

El manual del software FRAGSTATS (McGarigal et al. 2015), empleado para el cálculo de estas métricas, propone una clasificación de estas métricas en seis grupos de acuerdo con las características que miden: índices de área, superficie, densidad y variabilidad; índices de forma; índices de entorno y hábitat interior, índices de distancia, vecindad y conectividad e índices de diversidad del paisaje.

Los primeros caracterizan el tamaño y cantidad de los fragmentos que componen el paisaje. Los segundos, a partir de la relación entre el área y perímetro de los fragmentos, caracterizan la forma de éstos. Los índices de ecotono y hábitat interior se refieren a aspectos funcionales del paisaje, sin interés para el caso de esta tesis. Las métricas de distancia, vecindad y conectividad dan información sobre la proximidad y forma de rela-

ción entre los distintos fragmentos. Finalmente, el último tipo de métricas aportan información sobre la diversidad general del paisaje, en función de la distribución de sus fragmentos.

Para esta tesis se han empleado métricas a nivel de clase para caracterizan la distribución y patrón espacial de los datos espaciales analizados. En consecuencia, no se ha hecho uso de las métricas de diversidad, por referirse al nivel de paisaje (y no de clase), ni de los índices de ecotono y hábitat interior, por referirse a aspectos funcionales del paisaje. Del resto, hemos realizado una selección de métricas, de acuerdo con su poder explicativo para el objetivo de nuestros estudios. Si bien inicialmente fueron calculadas en buen número de ellas, sólo aquellas que presentaron una mayor variabilidad en sus resultados fueron seleccionadas.

A continuación, se hace una descripción exhaustiva de aquellas métricas empleadas en la realización de esta tesis doctoral. Para más detalles sobre éstas y otro conjunto de métricas espaciales existentes, consúltese Botequilha Leitao et al. (2006) y Turner y Gardner (2015).

B.7.3.1. Índices de área, superficie, densidad y variabilidad

La interpretación de estas métricas resulta sencilla, por referirse a magnitudes de superficie (área) y estadísticas de tendencia central comúnmente empleadas, como la media o la desviación estándar.

A) Área total

Índice que revela el total de superficie ocupado por el conjunto de fragmentos que componen una determinada clase, en metros cuadrados. Se calcula de acuerdo con la ecuación (21).

$$AREA = \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (21)$$

Dónde, *AREA* es el área total de los fragmentos que componen la clase analizada, *n* el número total de fragmentos y *a_{ij}* el área en metros cuadrados del fragmento *j*, perteneciente a la clase *i*.

B) Área media

Esta métrica de área da información sobre la superficie media de los fragmentos que componen una determinada clase en el área de análisis en metros cuadrados, de acuerdo con la ecuación (22).

$$AREA_{MN} = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{n_i} \quad (22)$$

Dónde, $AREA_{MN}$ es el área media de los fragmentos que componen la clase analizada, n el número total de fragmentos, n_i el número total de fragmentos para una clase específica y a_{ij} el área en metros cuadrados del fragmento j , perteneciente a la clase i .

C) Área media ponderada

A diferencia de la métrica anterior, el cálculo de la superficie media de los fragmentos de cada clase se encuentra aquí ponderada por el tamaño de estos polígonos, de tal manera que la métrica da más peso al área de aquellos fragmentos que sean más extensos. Esta métrica es así menos sensible a la omisión o incorporación de fragmentos muy pequeños, con lo que permite analizar el área de estudio en relación con el área de los fragmentos de mayor tamaño. Se calcula, en metros cuadrados, de acuerdo con la ecuación (23).

$$AREA_{AM} = \sum_{j=1}^n \left[a_{ij} \left(\frac{a_{ij}}{\sum_{j=1}^n a_{ij}} \right) \right] \quad (23)$$

Dónde, $AREA_{AM}$ es el área media ponderada de los fragmentos que componen la clase analizada, n el número total de fragmentos, y a_{ij} el área en metros cuadrados del fragmento j , perteneciente a la clase i .

D) Desviación estándar

Mide la variabilidad media del tamaño de los fragmentos pertenecientes a la misma clase, en relación con el área media de éstos. Lo hace, en metros cuadrados, de acuerdo con la ecuación (24).

$$AREA_{SD} = \sqrt{\frac{a_{ij} - \left(\frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{n_i} \right)}{n_i}} \quad (24)$$

Dónde, $AREA_{SD}$ es la desviación estándar de la superficie de los fragmentos que componen la clase analizada, n el número total de fragmentos, n_i el número total de fragmentos para una clase específica y a_{ij} el área en metros cuadrados del fragmento j , perteneciente a la clase i .

E) Coeficiente de variación

Se diferencia del anterior en que corrige la desviación estándar de acuerdo con el tamaño medio de los polígonos. Es decir, normaliza la desviación estándar para cada clase, expresando el resultado en porcentaje. Esto permite la comparación del coeficiente de variación entre diferentes clases de manera más precisa, en tanto este índice queda corregido por la diferente distribución en cada clase del tamaño de sus respectivos fragmentos. Se calcula de acuerdo con la ecuación (25).

$$AREA_{CV} = \frac{AREA_{SD}}{AREA_{MN}} \quad (100) \quad (25)$$

Dónde, $AREA_{CV}$ es el coeficiente de variación de la superficie de los fragmentos que componen la clase analizada, $AREA_{SD}$ la desviación estándar del área de los fragmentos que componen la clase analizada y $AREA_{MN}$ el área media de los fragmentos que componen la clase analizada.

F) Porcentaje respecto al total del área

Esta métrica revela la proporción que el conjunto de fragmentos de una determinada clase representa con respecto al total del área analizada. Se calcula de acuerdo con la ecuación (26).

$$PLAND = P_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A} \quad (100) \quad (26)$$

Dónde, $PLAND$ es la métrica considerada, P_i el porcentaje del área estudiada ocupado por la clase i , n el número total de fragmentos, a_{ij} el área en metros cuadrados del fragmento j , perteneciente a la clase i y A el área total en metros cuadrados ocupada por el área de estudio seleccionada.

G) Índice del fragmento más grande

Indica la proporción del total del área analizada que ocupa el fragmento más grande de los que componen la clase de análisis seleccionada. Se calcula de acuerdo con la ecuación (27).

$$LPI = \frac{\max_{j=1}^n(a_{ij})}{A} \quad (100) \quad (27)$$

Dónde, LPI es la proporción del fragmento más grande de la clase analizada sobre el conjunto del área de estudio, n el número total de fragmentos, a_{ji} área en metros cuadrados del fragmento j , perteneciente a la clase i y A el área total del ámbito de análisis, en metros cuadrados.

B.7.3.2. Índices de forma

Entre estos índices tan solo se ha seleccionado la dimensión fractal media (*mean fractal dimensión*). Ésta mide la complejidad media de la forma de los fragmentos que componen una clase determinada. Adquiere valores entre 1 y 2, indicando los valores más próximos a la unidad formas más simples y, al contrario, los valores más alejados de tal valor formas medias más complejas.

A diferencia de lo que sucede con otras métricas especiales que analizan la forma, la dimensión fractal permite analizar la complejidad de los fragmentos analizados a través de un amplio rango de escalas (Botequilha Leitao et al. 2006). Se calcula se acuerdo con la ecuación (28).

$$FRAC_{MN} = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{2 \ln(.25 p_{ij})}{\ln a_{ij}}}{n_i} \quad (28)$$

Dónde, $FRAC_{MN}$ es el área media de la dimensión fractal de los fragmentos que componen la clase analizada, n el número total de fragmentos, n_i el número total de fragmentos para una clase específica, p_{ij} el perímetro, en metros, del fragmento j , perteneciente a la clase i y a_{ij} el área en metros cuadrados del fragmento j , perteneciente a la clase i .

B.7.3.3. Índices de distancia, vecindad y conectividad

Se trata, junto con la anterior, de las métricas más difíciles de interpretar, por cuanto no se pueden a menudo entender en términos absolutos, sino que adquieren especial sentido cuando se utilizan de una manera comparativa, para evaluar las características de la configuración de dos áreas de estudio distintas.

Las tres primeras métricas que se desarrollan a continuación se encuentran correlacionadas y, por tanto, proporcionan información similar. De este modo, su uso en esta tesis es en la mayor parte de los casos exclusivo, de tal manera que la elección para un análisis de una de las tres métricas implica descartar las otras dos. De este modo, como norma general, para cada estudio se seleccionó una métrica distinta; aquella que poseyese el mayor poder explicativo.

La última métrica, el número de fragmentos, es una métrica básica, mucho más simple que las anteriores y, por tanto, muy fácil de interpretar por parte de cualquier usuario. Sin

embargo, proporcionada en términos absolutos, sin ninguna información sobre la estructura del espacio analizado, puede resultar engañosa.

A) Porcentaje de adyacencias similares

Esta métrica mide, en términos prácticos, el grado de agregación de los fragmentos de una determinada clase. Lo hace a partir del cálculo de las adyacencias internas de los píxeles de la misma clase con relación a sus adyacencias con respecto al resto de clases que conforman el área analizada, así como con respecto al borde del área de estudio (Fig. B.7). Menores valores significan que la clase se encuentra más desagregada, es decir, que las adyacencias de los píxeles de esta clase con otras clases son más importantes. Mayores valores, al contrario, implican que la clase se encuentra más agregada, es decir, que las adyacencias internas de los píxeles que conforman sus fragmentos son más relevantes.

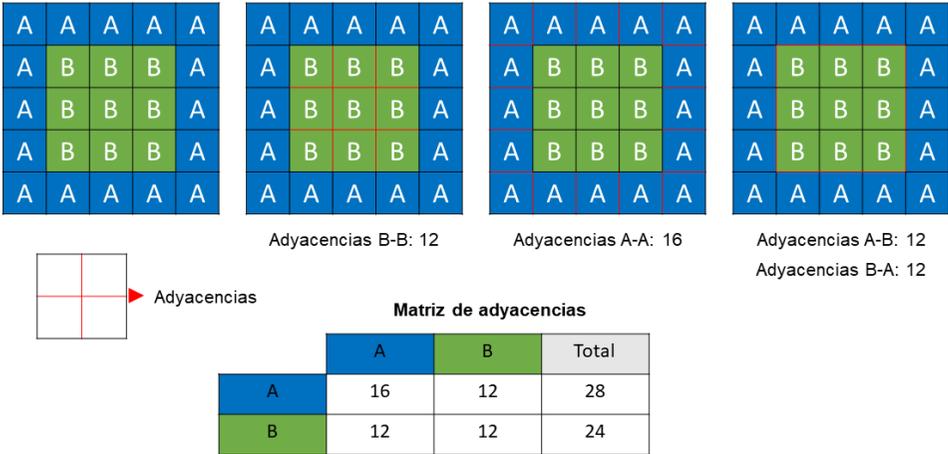


Figura B.7. Ejemplo teórico del cálculo de la matriz de adyacencias para la clase B en un mapa categórico binario de dos clases, A y B. De acuerdo con el método de doble conteo, las adyacencias entre cada clase y el resto se cuentan de manera doble (adyacencias A-B primero, adyacencias B-A después). Fuente: elaboración propia

Para realizar el cálculo de estas adyacencias, la métrica hace uso de la matriz de adyacencia (*adjacency matrix*), utilizando un método de doble conteo para el caso de adyacencias equivalentes (ej. azul-verde, verde-azul) (Fig. B.7). Además, el borde del área analizada se cuenta también como adyacencias (de la clase analizada con otra), aunque en este caso bajo un único conteo.

El porcentaje de adyacencias similares (*percentage of like adjacencies*) se obtiene de acuerdo con la fórmula matemática indicada en la ecuación (29).

$$PLAJD = \left(\frac{g_{ii}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right) (100) \quad (29)$$

Dónde, *PLAJD* es el porcentaje de adyacencias similares de los fragmentos que componen la clase analizada, *m* el número total de tipos de clases presentes en el paisaje, *g_{ii}* el número de adyacencias similares entre píxeles de la clase *i*, *g_{ik}* el número de adyacencias similares entre píxeles de la clases *i* y *k* según el método de doble conteo.

B) Cumpliness

Se calcula, al igual que la métrica anterior, a partir de la matriz de adyacencias (Fig. B.7). De hecho, el cálculo de esta métrica se hace a partir de la proporción de adyacencias similares, calculadas del mismo modo que en el caso anterior, pero sin porcentaje (31). De ahí la alta correlación entre ambos índices.

Adquiere valores entre -1 y 1. Valores negativos significan que los fragmentos de la clase analizada se encuentran desagregados, un valor de 0 que los fragmentos se encuentran distribuidos aleatoriamente, mientras que valores positivos implican que los fragmentos de la clase analizada se encuentran agregados, indicando valores más cercanos a la unidad una mayor agregación. El índice se calcula de acuerdo con lo indicado en la ecuación (30).

$$CLUMPY = \begin{cases} \frac{G_i - P_i}{1 - P_i} \text{ para } G_i \geq P_i \\ \frac{G_i - P_i}{1 - P_i} \text{ para } G_i < P_i; P_i \geq 5 \\ \frac{G_i - P_i}{1 - P_i} \text{ para } G_i < P_i; P_i < 5 \end{cases} \quad (30)$$

dónde

$$G_i = \left(\frac{G_{ii}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right) \quad (31)$$

Dónde, *CUMPLY* es el índice cumpliness de los fragmentos que componen la clase analizada, *g_{ii}* el número de adyacencias similares entre píxeles de la clase *i*, *m* el número total de tipos de clases presentes en el paisaje, *g_{ii}* el número de adyacencias similares entre píxeles de la clase *i* según el método de doble conteo, *g_{ik}* el número de adyacencias similares entre píxeles de la clases *i* y *k* según el método de doble conteo y *P_i* la proporción del área analizada ocupada por cada tipo de clase *i*.

C) Índice de cohesión de los fragmentos

Al igual que las dos métricas anteriores, hace referencia al nivel de agregación o cohesión de los fragmentos que forman parte de una determinada clase. No obstante, posee un

cálculo distinto a los vistos con anterioridad, al no hacer uso de la matriz de adyacencias. Al contrario, este índice calcula la cohesión de los fragmentos para una determinada clase en función de la relación del área y perímetro de los mismos con respecto al total del área del paisaje, de acuerdo con la ecuación (32). Esto le permite ser menos dependiente del cambio de la resolución espacial con respecto a la métrica que revela el porcentaje de adyacencias similares (Mcgarigal).

Adquiere valores entre 0 y 100, significando valores más bajos una menor cohesión de los fragmentos de la clase analizada y valores más elevados lo contrario. El índice incrementa monótonamente hasta que alcanza un umbral, en el que se vuelve nulo. De este modo, un área de estudio formada por un único fragmento perteneciente a una única clase tendría asignada un valor del índice de cohesión de 0 (McGarigal et al. 2015).

$$COHESION = \left[1 - \frac{\sum_{j=1}^n p_{ij}}{\sum_{j=1}^n p_{ij} \sqrt{a_{ij}}} \right] \cdot \left[1 - \frac{1}{\sqrt{Z}} \right]^{-1} \cdot (100) \quad (32)$$

Dónde, *COHESION* es el índice de cohesión de los fragmentos que componen la clase analizada, *n* el número total de fragmentos, *p_{ij}* el perímetro en número de celdas del fragmento *j*, perteneciente a la clase *i*, *a_{ij}* el área en número de celdas del fragmento *j*, perteneciente a la clase *i* y *Z* el número total de celdas en el área analizada.

D) Número total de fragmentos

Se trata de una métrica simple, que informa del número total de fragmentos que componen cada clase analizada. Se calcula de acuerdo con la ecuación (33).

$$PN = \sum_{i=1}^n P_i \quad (33)$$

Dónde, *PN* es el número total de los fragmentos que componen la clase analizada, *n* el número total de fragmentos y *P_i* el tipo de fragmento *i*.

References

References

Chapter 1

- Abuelaish B, Camacho Olmedo MT (2016) Scenario of land use and land cover change in the Gaza Strip using remote sensing and GIS models. *Arab J Geosci* 9: . doi: 10.1007/s12517-015-2292-7
- Aerts JCJH, Clarke KC, Keuper AD (2003) Testing Popular Visualization Techniques for Representing Model Uncertainty. *Cartogr Geogr Inf Sci* 30:249–261 . doi: 10.1559/152304003100011180
- Alexander P, Prestele R, Verburg PH, et al (2015) Assessing uncertainties in land cover projections. *Glob Chang Biol in review*:1–15 . doi: 10.1111/gcb.13447
- Barredo JL, Kasanko M, McCormick N, Lavalle C (2003) Modelling dynamic spatial processes: simulation of urban future scenarios through cellular automata. *Landsc Urban Plan* 64:145–160 . doi: 10.1016/S0169-2046(02)00218-9
- Barreira González P (2017) Local urban growth simulation: An irregular Cellular Automata based model approach. Universidad de Alcalá
- Barreira González P, Aguilera Benavente F, Gómez Delgado M (2012) Propuesta de un análisis de sensibilidad para validar modelos prospectivos de simulación de crecimiento urbano basados en autómatas celulares. *Geofocus* 12:303–328
- Basheer A (2017) Modelling land change scenarios in the Gaza strip and impacts on the environmental elements. Universidad de Granada
- Benke KK, Pettit CJ, Lowell KE (2011) Visualisation of spatial uncertainty in hydrological modelling. *J Spat Sci* 56:73–88 . doi: 10.1080/14498596.2011.567412
- Brown DG, Verburg PH, Pontius Jr. RG, Lange MD (2013) Opportunities to improve impact, integration, and evaluation of land change models. *Curr Opin Environ Sustain* 5:452–457 . doi: 10.1016/j.cosust.2013.07.012
- Buyantuyev A, Wu J (2007) Effects of thematic resolution on landscape pattern analysis. *Landsc Ecol* 22:7–13 . doi: 10.1007/s10980-006-9010-5
- Buyantuyev A, Wu J, Gries C (2010) Multiscale analysis of the urbanization pattern of the Phoenix metropolitan landscape of USA: Time, space and thematic resolution. *Landsc Urban Plan* 94:206–217 . doi: 10.1016/j.landurbplan.2009.10.005
- Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F (2013) Interest in intermediate soft-classified maps in land change model validation: suitability versus transition potential. *Int J Geogr Inf Sci* 27:2343–2361 . doi: 10.1080/13658816.2013.831867
- Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (2018a) Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios: An Introduction. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 1–8
- Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (2018b) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland
- Camacho Olmedo MT, Pontius Jr RG, Paegelow M, Mas J-F (2015) Comparison of simulation models in terms of quantity and allocation of land change. *Environ Model Softw* 69:214–221 . doi: 10.1016/j.envsoft.2015.03.003
- Clarke KC (2018) A Short Presentation of SLEUTH. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 521–525
- Couclelis H (1985) Cellular worlds: a framework for modeling micro - macro dynamics. *Environ Plan A* 17:585–596 . doi: 10.1068/a170585
- Crone GR (2000) *Historia de los mapas*. Fondo de Cultura Económica, Madrid

- de Carvalho Cantergiani C (2017) Desarrollo de un prototipo de Modelo Basado en Agentes para la simulación del crecimiento urbano. Universidad de Alcalá
- Díaz-Pacheco J, Hewitt R (2014) Modelado de cambios de usos de suelo urbano a través de redes neuronales artificiales. Comparación con dos aplicaciones de software. *GeoFocus*. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004
- Díaz-Pacheco J, Van Delden H, Hewitt R (2018) The importance of scale in land use models: experiments in data conversion, data resampling, resolution and neighbourhood extent. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 163–186
- Elsawah S, Pierce SA, Hamilton SH, et al (2017) An overview of the system dynamics process for integrated modelling of socio-ecological systems: Lessons on good modelling practice from five case studies. *Environ Model Softw* 93:127–145 . doi: 10.1016/j.envsoft.2017.03.001
- Eric K, John S, Aldrik B, Scholten HJ (2007) *Modelling Land-use Change: Progress and Applications*. Springer, Dordrecht, The Netherlands
- Fisher PF (2005) Models of uncertainty in spatial data. In: Longley PA, Goodchild MF, Maguire DJ, Rhind DW (eds) *Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications*. Wiley, pp 191–205
- Gallardo M (2014) Cambios de usos del suelo y simulación de escenarios en la Comunidad de Madrid. Universidad Complutense de Madrid
- Gallardo M, Martínez-Vega J (2018) Modeling Land-Use Scenarios in Protected Areas of an Urban Region in Spain. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 307–328
- García AM, Santé I, Crecente R, Miranda D (2011) An analysis of the effect of the stochastic component of urban cellular automata models. *Comput Environ Urban Syst* 35:289–296 . doi: 10.1016/j.compenvurbysys.2010.11.001
- Gómez Delgado M, Bosque Sendra J (2004a) Aplicación de análisis de incertidumbre como método de validación y control del riesgo en la toma de decisiones. *GeoFocus* 4:179–208
- Gómez Delgado M, Bosque Sendra J (2004b) Sensitivity Analysis in Multicriteria Spatial Decision-Making: A Review. *Hum Ecol Risk Assess An Int J* 10:1173–1187 . doi: 10.1080/10807030490887221
- Gómez Mendoza J (2013) La evolución de la investigación en la geografía española durante los últimos decenios. In: Lasanta T, Martín Vide J (eds) *La Investigación Geográfica en España (1990-2012)*. Asociación de Geógrafos Españoles, Instituto Pirenaico de Ecología, Arnedo, pp 21–42
- Goodchild MF (2001) Models of Scale and Scales of Modelling. In: *Modeling Scale in Geographical Information Science*. p 277
- Goodchild MF (2011) Scale in GIS: An overview. *Geomorphology* 130:5–9 . doi: 10.1016/j.geomorph.2010.10.004
- Hersperger AM, Gennaio M-P, Verburg PH, Bürgi M (2010) Linking Land Change with Driving Forces and Actors: Four Conceptual Models. *Ecol Soc* 15:1–17
- Hewitt R (2018) A Short Presentation of the Actor, Policy, and Land Use Simulator (APoLUS). In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 475–480
- Hewitt R (2014) Diffusion Pathways and Sustainable Development in the Madrid Region. Universidad de Alcalá
- Hewitt R, Díaz-Pacheco J (2017) Stable models for metastable systems? Lessons from sensitivity analysis of a Cellular Automata urban land use model. *Comput Environ Urban Syst* 62:113–124 . doi: 10.1016/j.compenvurbysys.2016.10.011
- Hewitt R, Van Delden H, Escobar F (2014) Participatory land use modelling, pathways to an integrated approach. *Environ Model Softw* 52:149–165 . doi: 10.1016/j.envsoft.2013.10.019
- Jenerette GD, Wu J (1997) On the Definitions of Scale. *Bull Ecol Soc Am* 81:104–105 . doi: 10.2307/20168403

- Keogh A, Pettit C, Lowell K (2007) Development of a landscape visualisation tool for communicating hydrological uncertainty. In: MODSIM07 - Land, Water and Environmental Management: Integrated Systems for Sustainability. pp 3084–3090
- Klein Goldewijk K, Verburg PH (2013) Uncertainties in global-scale reconstructions of historical land use: An illustration using the HYDE data set. *Landsc Ecol* 28:861–877 . doi: 10.1007/s10980-013-9877-x
- Kocabas V, Dragicevic S (2006) Assessing cellular automata model behaviour using a sensitivity analysis approach. *Comput Environ Urban Syst* 30:921–953 . doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2006.01.001
- Koomen E, Stillwell J (2007) Modelling Land-Use Change. Theories and Methods. In: Eric K, John S, Aldrik B, Scholten HJ (eds) *Modelling Land-use Change: Progress and Applications*. Springer, Dordrecht, The Netherlands, pp 1–22
- Kozak J, Gimmi U, Houet T, Bolliger J (2017) Current practices and challenges for modelling past and future land use and land cover changes in mountainous regions. *Reg Environ Chang*. doi: 10.1007/s10113-017-1217-2
- Li H, Wu J (2006) Uncertainty analysis in ecological studies: an overview. In: Wu J, Jones KB, Li H, Loucks OL (eds) *Scaling and Uncertainty Analysis in Ecology: Methods and Applications*. Springer, Dordrecht, pp 45–66
- Lloyd CD (2015) Spatial scale and small area population statistics for England and Wales. *Int J Geogr Inf Sci* 8816:1–20 . doi: 10.1080/13658816.2015.1111377
- Lloyd CD (2014) *Exploring Spatial Scale in Geography*. Wiley, Chichester
- Lowell KE (2008) Uncertainty in Landscape Models: Sources, Impacts and Decision Making. In: Pettit C, Cartwright W, Bishop I, et al. (eds) *Landscape Analysis and Visualisation*. Berlin, Heidelberg, pp 367–382
- Ma Q, He C, Wu J (2016) Behind the rapid expansion of urban impervious surfaces in China: Major influencing factors revealed by a hierarchical multiscale analysis. *Land use policy* 59:434–445 . doi: 10.1016/j.landusepol.2016.09.012
- Maestriperi N, Paegelow M (2013) Validation spatiale de deux modèles de simulation: L'exemple des plantations industrielles au Chili. *CyberGeo*. doi: 10.4000/cybergeo.26042
- Maier HR, Guillaume JHA, Van Delden H, et al (2016) An uncertain future, deep uncertainty, scenarios, robustness and adaptation: How do they fit together? *Environ Model Softw* 81:154–164 . doi: 10.1016/j.envsoft.2016.03.014
- Marceau DJ (1999) The scale issue in social and natural sciences. *Can J Remote Sens* 25:347–356 . doi: 10.1080/07038992.1999.10874734
- Marceau DJ, Wang F, Wijesekera N (2013) Investigating Land-Use Dynamics at the Periphery of a Fast-Growing City with Cellular Automata at Two Spatial Scales. In: Malkinson D, Czamanski D, Benenson I (eds) *Modeling of Land-Use and Ecological Dynamics*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp 51–79
- Martínez-Vega J, Díaz A, Nava JM, et al (2017) Assessing Land Use-Cover Changes and Modelling Change Scenarios in Two Mountain Spanish National Parks. *Environments* 4:79 . doi: 10.3390/environments4040079
- Mas J-F, Kolb M, Houet T, et al (2011) Éclairer le choix des outils de simulation des changements des modes d'occupation et d'usages des sols. Une approche comparative. *Rev Int Géomatique* 21:405–430 . doi: 10.3166/RIG.15.297-322
- Mas J-F, Kolb M, Paegelow M, et al (2014) Inductive pattern-based land use/cover change models: A comparison of four software packages. *Environ Model Softw* 51:94–111 . doi: 10.1016/j.envsoft.2013.09.010
- Matott LS, Babendreier JE, Purucker ST (2009) Evaluating uncertainty in integrated environmental models: A review of concepts and tools. *Water Resour Res* 45:1–14 . doi: 10.1029/2008WR007301
- Maurín Álvarez M (2014) Adaptarse para sobrevivir: la táctica silenciosa de la geografía contemporánea. *Ería* 95:281–304
- Ménard A, Marceau DJ (2005) Exploration of spatial scale sensitivity in geographic cellular automata. *Environ Plan B Plan Des* 32:693–714 . doi: 10.1068/b31163
- Messina JP, Evans TP, Manson SM, et al (2008) Complex systems models and the management of error and uncertainty. *J Land Use Sci* 3:11–25

- National Research Council (2014) *Advancing Land Change Modeling: Opportunities and Research Requirements*. National Academies Press, Washington, D.C.
- Nino-Ruiz M, Bishop I, Pettit C (2013) Spatial model steering, an exploratory approach to uncertainty awareness in land use allocation. *Environ Model Softw* 39:70–80 . doi: 10.1016/j.envsoft.2012.06.009
- O’Sullivan D, Perry GLW (2013) *Spatial Simulation: Exploring Pattern and Process*. Wiley, Chichester
- Ortega Valcárcel J (2000) *Los horizontes de la Geografía. Teoría de la Geografía*. Ariel, Barcelona
- Paegelow M, Camacho Olmedo MT (2008a) *Modelling Environmental Dynamics*. *Advances in Geomatic Solutions*. Springer, Berlin, Heidelberg
- Paegelow M, Camacho Olmedo MT (2008b) *Advances in geomatic simulations for environmental dynamics*. In: Paegelow M, Camacho Olmedo MT (eds) *Modelling Environmental Dynamics*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp 3–54
- Paegelow M, Camacho Olmedo MT, Houet T, et al (2013) Land change modeling: moving beyond projections. *Int J Geogr In- Form Sci* 27:1691–1695 . doi: <https://doi.org/10.1080/13658816.2013.819104>
- Pan Y, Roth A, Yu Z, Doluschitz R (2010) The impact of variation in scale on the behavior of a cellular automata used for land use change modeling. *Comput Environ Urban Syst* 34:400–408 . doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2010.03.003
- Pérez-Vega A, Mas J-F, Ligmann-Zielinska A (2012) Comparing two approaches to land use/cover change modeling and their implications for the assessment of biodiversity loss in a deciduous tropical forest. *Environ Model Softw* 29:11–23 . doi: 10.1016/j.envsoft.2011.09.011
- Perry GLW (2009) *Modelling and simulation*. In: Castree N, Demeritt D, Liverman D, Rhoads B (eds) *A Companion to Environmental Geography*. Wiley, Chichester, pp 336–356
- Plata Rocha W, Gómez Delgado M, Bosque Sendra J (2012) Proposal for the Introduction of the Spatial Perspective in the Application of Global Sensitivity Analysis. *J Geogr Inf Syst* 4:503–513 . doi: 10.4236/jgis.2012.46055
- Pontius Jr. RG (2008) *Foreword*. In: Paegelow M, Camacho Olmedo MT (eds) *Modelling Environmental Dynamics*. *Advances in Geomatic Solutions*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp v–vii
- Pontius Jr. RG (2000) Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. *Photogramm Eng Remote Sensing* 66:1011–1016
- Pontius Jr. RG, Boersma W, Castella J-C, et al (2008) Comparing the input, output, and validation maps for several models of land change. *Ann Reg Sci* 42:11–37 . doi: 10.1007/s00168-007-0138-2
- Pontius Jr. RG, Cheuk ML (2006) A generalized cross tabulation matrix to compare soft classified maps at multiple resolutions. *Int J Geogr Inf Sci* 20:1–30 . doi: 10.1080/13658810500391024
- Pontius Jr. RG, Huffaker D, Denman K (2004a) Useful techniques of validation for spatially explicit land-change models. *Ecol Modell* 179:445–461 . doi: 10.1016/j.ecolmodel.2004.05.010
- Pontius Jr. RG, Millones M (2011) Death to Kappa: birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. *Int J Remote Sens* 32:4407–4429 . doi: 10.1080/01431161.2011.552923
- Pontius Jr. RG, Peethambaram S, Castella J-C (2011) Comparison of Three Maps at Multiple Resolutions: A Case Study of Land Change Simulation in Cho Don District, Vietnam. *Ann Assoc Am Geogr* 101:45–62 . doi: 10.1080/00045608.2010.517742
- Pontius Jr. RG, Santacruz A (2014) Quantity, exchange, and shift components of difference in a square contingency table. *Int J Remote Sens* 35:7543–7554 . doi: 10.1080/2150704X.2014.969814
- Pontius Jr. RG, Shusas E, McEachern M (2004b) Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agric Ecosyst Environ* 101:251–268 . doi: 10.1016/j.agee.2003.09.008
- Pontius Jr RG, Parmentier B (2014) Recommendations for using the relative operating characteristic (ROC). *Landsc Ecol* 29:367–382
- Prestele R, Alexander P, Rounsevell MDA, et al (2016) Hotspots of uncertainty in land-use and land-cover change projections: a global-scale model comparison. *Glob Chang Biol* 22:3967–3983 . doi: 10.1111/gcb.13337
- Quattrochi DA, Emerson CW, Siu-Ngan Lam N, Qui H (2001) Fractal characterization of multitemporal remote sensing data. In: Tate NJ, Atkinson PM (eds) *Modelling Scale in Geographical Information Science*. Wiley, Chichester, New York, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto, pp 13–34

- Quattrochi DA, Goodchild MF (1997a) Scale, Multiscaling, Remote Sensing, and GIS. In: Quattrochi DA, Goodchild MF (eds) *Scale in Remote Sensing and GIS*. CRC press, Boca Raton, pp 1–11
- Quattrochi DA, Goodchild MF (1997b) *Scale in remote sensing and GIS*. CRC Press, Boca Raton
- Şalap-Ayça S, Jankowski P, Clarke KC, et al (2018) A meta-modeling approach for spatio-temporal uncertainty and sensitivity analysis: an application for a cellular automata-based Urban growth and land-use change model. *Int J Geogr Inf Sci* 32:637–662 . doi: 10.1080/13658816.2017.1406944
- Samat N (2006) Characterizing the scale sensitivity of the cellular automata simulated urban growth: A case study of the Seberang Perai Region, Penang State, Malaysia. *Comput Environ Urban Syst* 30:905–920 . doi: 10.1016/j.compenvurbysys.2005.11.002
- Santé I, García AM, Miranda D, Crecente R (2010) Cellular automata models for the simulation of real-world urban processes: A review and analysis. *Landsc Urban Plan* 96:108–122 . doi: 10.1016/j.landurbplan.2010.03.001
- Sohl TL, Claggett PR (2013) Clarity versus complexity: Land-use modeling as a practical tool for decision-makers. *J Environ Manage* 129:235–243 . doi: 10.1016/j.jenvman.2013.07.027
- Van Asselt MBA (2000) *Perspectives on Uncertainty and Risk - the PRIMA Approach to Decision Support*. Kluwer Academic Publishers, Boston, Dordrecht, London
- Van Delden H, Seppelt R, White R, Jakeman AJ (2011) A methodology for the design and development of integrated models for policy support. *Environ Model Softw* 26:266–279 . doi: 10.1016/j.envsoft.2010.03.021
- Van Schrojenstein Lantman J, Verburg PH, Bregt A, Geertman S (2011) Core Principles and Concepts in Land-Use Modelling: A Literature Review. In: Koomen E, Borsboom-Van Beurden J (eds) *Land-Use Modelling in Planning Practice*. Springer, Dordrecht, Heidelberg, London, New York, pp 35–57
- Van Vliet J, Bregt AK, Brown DG, et al (2016) A review of current calibration and validation practices in land-change modeling. *Environ Model Softw* 82:174–182 . doi: 10.1016/j.envsoft.2016.04.017
- Van Vliet J, Bregt AK, Hagen-Zanker A (2011) Revisiting Kappa to account for change in the accuracy assessment of land-use change models. *Ecol Modell* 222:1367–1375 . doi: 10.1016/j.ecolmodel.2011.01.017
- Van Vliet J, Hagen-Zanker A, Hurkens J, Van Delden H (2013a) A fuzzy set approach to assess the predictive accuracy of land use simulations. *Ecol Modell* 261–262:32–42 . doi: 10.1016/j.ecolmodel.2013.03.019
- Van Vliet J, Naus N, Van Lammeren RJA, et al (2013b) Measuring the neighbourhood effect to calibrate land use models. *Comput Environ Urban Syst* 41:55–64 . doi: 10.1016/j.compenvurbysys.2013.03.006
- Van Vliet J, Verburg PH (2018) A Short Presentation of CLUMondo. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 485–492
- Verburg PH, Eickhout B, Van Meijl H (2007) A multi-scale, multi-model approach for analyzing the future dynamics of European land use. *Ann Reg Sci* 42:57–77 . doi: 10.1007/s00168-007-0136-4
- Verburg PH, Kok K, Pontius Jr. RG, Veldkamp A (2006) Modeling Land-Use and Land-Cover Change. Local Processes and Global Impacts. In: Lambin EF, Geist H (eds) *Land-Use and Land-Cover Change*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp 117–135
- Verburg PH, Schot P, Dijst M, Veldkamp A (2004) Land use change modelling: current practice and research priorities. *GeoJournal* 61:309–324 . doi: 10.1007/s10708-004-4946-y
- Verburg PH, Tabeau A, Hatna E (2013) Assessing spatial uncertainties of land allocation using a scenario approach and sensitivity analysis: A study for land use in Europe. *J Environ Manage* 127:S132–S144 . doi: 10.1016/j.jenvman.2012.08.038
- Vilar L, Gómez I, Martínez-Vega J, et al (2016) Multitemporal modelling of socio-economic wildfire drivers in central Spain between the 1980s and the 2000s: Comparing generalized linear models to machine learning algorithms. *PLoS One* 11: . doi: 10.1371/journal.pone.0161344
- Villa N, Paegelow M, Camacho Olmedo MT, et al (2007) Various Approaches for Predicting Land Cover in Mountain Areas. *Commun Stat - Simul Comput* 36:73–86 . doi: 10.1080/03610910601096379
- Wainwright J, Mulligan M (2013) *Environmental Modelling: Finding Simplicity in Complexity*, 2 edition. Wiley, Chichester

- Wang F, Marceau DJ (2013) A patch-based cellular automaton for simulating land-use changes at fine spatial resolution. *Trans GIS* 17:828–846 . doi: 10.1111/tgis.12009
- Warmink JJ, Janssen JAEB, Booi MJ, Krol MS (2010) Identification and classification of uncertainties in the application of environmental models. *Environ Model Softw* 25:1518–1527 . doi: 10.1016/j.envsoft.2010.04.011
- Watson MK (1978) The Scale Problem in Human Geography. *Geogr Ann Ser B* 60:36–47 . doi: 10.2307/490730
- White R (2018) Foreword. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp v–xi
- White R, Engelen G, Uljee I (2015) *Modeling cities and regions as complex systems: from theory to planning applications*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England
- Wilson AG (2000) *Complex spatial systems: The modelling foundations of urban and regional analysis*. Pearson Education Limited, Harlow
- Wu H, Li ZL (2009) Scale issues in remote sensing: A review on analysis, processing and modeling. *Sensors* 9:1768–1793 . doi: 10.3390/s90301768
- Wu J (2004) Effects of changing scale on landscape pattern analysis: Scaling relations. *Landsc Ecol* 19:125–138 . doi: 10.1023/B:LAND.0000021711.40074.ac
- Wu J (2007) Scale and scaling: a cross-disciplinary perspective. In: Wu J, Hobbs RJ (eds) *Key Topics in Landscape Ecology*. Cambridge University Press, Cambridge, New York, pp 115–142
- Wu J, Harbin L (2006a) Concepts of Scale and Scaling. In: Wu J, Jones KB, Li H, Loucks OL (eds) *Scaling and Uncertainty Analysis in Ecology: Methods and Applications*. Springer, Dordrecht, The Netherlands, pp 3–15
- Wu J, Harbin L (2006b) Perspectives and methods of scaling. In: Wu J, Jones KB, Li H, Loucks OL (eds) *Scaling and Uncertainty Analysis in Ecology: Methods and Applications*. Springer, Dordrecht, The Netherlands, pp 17–44
- Wu J, Li H, Bruce Jones K, Loucks OL (2006) Scaling with known uncertainty: a synthesis. In: Wu J, Jones KB, Li H, Loucks OL (eds) *Scaling and Uncertainty Analysis in Ecology: Methods and Applications*. Springer, Dordrecht, The Netherlands, pp 329–346
- Wu J, Qi Y (2000) Dealing with Scale in Landscape Analysis: An Overview. *Ann GIS* 6:1–5 . doi: 10.1080/10824000009480528
- Wu J, Shen W, Sun W, Tueller PT (2002) Empirical patterns of the effects of changing scale on landscape metrics. *Landsc Ecol* 17:761–782 . doi: 10.1023/A:1022995922992
- Yeh AG-O, Li X (2006) Errors and uncertainties in urban cellular automata. *Comput Environ Urban Syst* 30:10–28 . doi: 10.1016/j.compenurbysys.2004.05.007

Chapter 2

- Abad Aragón LD, Prada Trigo J (2010) Patrimonio minero-industrial, gobernanza y desarrollo territorial: El caso de Langreo (Asturias). *re Met* 1–11
- Alvargonzález Rodríguez R (1977) Gijón industrialización y crecimiento urbano. *Ayalga*, Gijón
- Benito del Pozo P (2006) Promoción Y Valorización Del Suelo Industrial En Asturias. *Boletín la Asoc Geógrafos Españoles* 42:99–120
- Benito del Pozo P (2016) Renovación urbana, herencia industrial y turismo: un proceso con elementos de éxito en Avilés (Asturias). *Boletín la Asoc Geógrafos Españoles* 72:271–284 . doi: 10.21138/bage.2341
- Benito del Pozo P (1990) El declinar de los espacios minero-siderúrgicos tradicionales: evolución reciente de Mieres y Langreo (Asturias). *Ería* 23:235–252 . doi: <https://doi.org/10.17811/er.0.1990.235-252>
- Benito del Pozo P, López González A (2004) Terciarización y nuevas formas de comercio en Asturias. *Doc d'Anàlisi Geogr* 43:27–44
- Benito del Pozo P, Morales Matos G (1992) La Organización del Espacio Industrial en Asturias. In: Morales Matos G (ed) *Geografía de Asturias*. Tomo II. Editorial Prensa Asturiana, Oviedo, pp 81–96

- Bielza de Ory V (2008) Introducción a la ordenación del territorio: un enfoque geográfico. Prensas Universitarias de Zaragoza, Zaragoza
- Bulnes R (1966) Asturias: frente a su reconversión industrial. *Cuad Ruedo Ibérico* 6:37–53
- Calleja Puerta M, Fernández Cuesta G, Fernández García F (eds) (2015) VRBE I. La construcción histórica de la ciudad de Oviedo. Universidad de Oviedo, Oviedo
- Carrero de Roa C (2011) La sostenibilidad del crecimiento residencial en baja densidad. El caso del Área Metropolitana de Asturias. Universidad de Oviedo
- Carrero de Roa M (2012) Transformaciones de los espacios rururbanos en el Área Metropolitana de Asturias. In: Alonso Ibáñez MR, Pérez Fernández JM (eds) Espacio metropolitano y difusión urbana: su incidencia en el medio rural. Consejo Económico y Social del Principado de Asturias, Oviedo, pp 135–154
- Cortizo Álvarez T (1992) Las Ciudades Asturianas en la Segunda Mitad del Siglo XX. In: Morales Matos G (ed) Geografía de Asturias. Tomo II. Editorial Prensa Asturiana, Oviedo, pp 48–64
- Cortizo Álvarez T, Fernández García F, Maceda Rubio A (1990) Asturias. In: Bosque Maurel J, Vilá Valentín J (eds) Geografía de España 4. Galicia, Asturias y Cantabria. Planeta, Barcelona, pp 289–460
- Dirección General de la Vivienda (2000) Atlas Estadístico de las Áreas Urbanas en España 2000
- Dirección General de Urbanismo (1964) Plan General de Ordenación Urbana de la Comarca Central de Asturias. Ministerio de la Vivienda, Secretaría General Técnica, Madrid
- Fernández Cuesta G (ed) (2015) VRBE II. La construcción histórica de la ciudad de Gijón. Universidad de Oviedo
- Fernández Fernández P (1992) Mieres. In: Morales Matos G (ed) Geografía de Asturias. Tomo IV. Editorial Prensa Asturiana, Oviedo
- Fernández García A (2010) Problemas territoriales de Asturias: representación gráfica
- Fernández García A (2013) El área de influencia de Oviedo: Siero y Llanera. In: Alonso Ibáñez MR, Fernández García A, Herrán Alonso M, et al. (eds) Regeneración urbanística y territorial integrada. Grupo de Estudios Jurídico-Sociales sobre Territorio y Desarrollo Sostenible, Langreo, pp 9–11
- Fernández García A (1992a) La Cuenca Hullera Central. In: Morales Matos G (ed) Geografía de Asturias. Tomo IV. Editorial Prensa Asturiana, Oviedo, pp 73–92
- Fernández García A (1992b) El Valle de Langreo: Langreo y San Martín del Rey Aurelio. In: Morales Matos G (ed) Geografía de Asturias. Tomo IV. Editorial Prensa Asturiana, Oviedo, pp 92–112
- Fernández García A (2003a) Las pautas del crecimiento urbano posindustrial: de la rururbanización a la ciudad difusa. *Ería* 60:88–92 . doi: <https://doi.org/10.17811/er.0.2003.88-92>
- Fernández García A (2003b) Hipermercados y centros comerciales en Asturias. *Ería* 62:341–349 . doi: <https://doi.org/10.17811/er.0.2003.341-349>
- Fernández García A, Ortega Montequín M, Sevilla Álvarez J, et al (2007) Población, administración y territorio en Asturias. Consejo Económico y Social del Principado de Asturias, Oviedo
- Fernández García F (1984) El Polo de desarrollo de Oviedo. *Ería* 7:135–147
- Fernández García F (1986) La franja periurbana de Gijón. Consejería de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente del Principado de Asturias, Ayuntamiento de Gijón y Banco de Bilbao, Oviedo
- Fernández Nogueroles S (2013) La implantación de la Zona de Actividades Logísticas e Industriales de Asturias y su repercusión territorial (2004-2012). *Ería* 90:55–74
- Fernández Prieto JR (1982) Organización del sistema urbano asturiano. *Ería* 3:55–77
- Fernández Prieto JR, Fernández Cuesta G (1991) El sistema urbano asturiano. *Ería* 26:1–8
- Fernández Soto M (2013) Las transformaciones territoriales y paisajísticas recientes de la comarca de Avilés. Universidad de Oviedo
- García Fernández J (1980) Sociedad y organización tradicional del espacio en Asturias. Silverio Cañada, Gijón
- García Oviedo V, Méndez García B, Ortega Montequín M (2013) El Área Metropolitana Central de Asturias (AMCA) y el Plan Territorial Especial de los nudos metropolitanos de los concejos de Llanera y Siero. In: Alonso Ibáñez MR, Fernández García A, Herrán Alonso M, et al. (eds) Regeneración urbanística y territorial integrada. Grupo de Estudios Jurídico-Sociales sobre Territorio y Desarrollo Sostenible, Langreo, pp 21–55

- Gobierno del Principado de Asturias (2016) Directrices subregionales de ordenación del Área Central de Asturias. Avance: objetivos y criterios
- Gobierno del Principado de Asturias (1991) Directrices Regionales de Ordenación del Territorio
- Gobierno del Principado de Asturias (2010) Decreto 119/2010, de 15 de septiembre, por el que se aprueba definitivamente la Revisión de las Directrices Sectoriales de Equipamiento Comercial
- Gobierno del Principado de Asturias (2006a) Avance de la Revisión de las Directrices Regionales de Ordenación del Territorio
- Gobierno del Principado de Asturias (2006b) Plan Territorial Especial de Recuperación de los Terrenos de HUNOSA en las Cuencas Mineras
- Gobierno del Principado de Asturias (2004) Decreto Legislativo 1/2004, de 22 de abril, por el que se aprueba el Texto Refundido de las disposiciones legales vigentes en materia de ordenación del territorio y urbanismo
- Gobierno del Principado de Asturias (2003) RESOLUCIÓN de 30 de abril de 2003, de la Consejería de Infraestructuras y Política Territorial, por la que se aprueba y se ordena publicar el documento “Marco de criterios, requisitos y condiciones para la catalogación de los núcleos rurales en el Prin
- González Marroquín V (2014) Estudio del crecimiento urbano disperso en España mediante el uso de los Sistemas de Información Geográfica: tres ensayos. Universidad de Oviedo
- González Marroquín V, Rubiera Morollón F, Pérez Rivero JL (2014) Dispersión urbana en áreas metropolitanas policéntricas no coordinadas. Análisis del caso asturiano mediante el uso de sistemas de información geográfica. *Archit City Environ* 8:38–62 . doi: 10.5821/ace.8.24.2715
- Herrán Alonso M (2002) La evolución del paisaje en un espacio periurbano: Lugones-Posada de Llanera (Asturias). *Ería* 57:25–48 . doi: <https://doi.org/10.17811/er.0.2002.25-48>
- INDUROT (2006) Parque periurbano del Naranco - Nora. Plan Territorial Especial Supramunicipal. Documento de aprobación inicial
- Leal Bóveda JM (2007) Estudio geográfico-histórico del puerto de Avilés. In: Guía didáctica del puerto de Avilés. Tórculo ediciones, Universidad de Oviedo
- Madera González M (2016) La ordenación urbanística del borde occidental de Oviedo. Proyectos y materialización. *Ería* 99-100–100:303–323 . doi: <https://doi.org/10.17811/er.99.2016.303-323>
- Madera González M, Alvargonzález R (1992) El Cabo Peñas: Carreño y Gozón. In: Morales Matos G (ed) *Geografía de Asturias*. Tomo III. Editorial Prensa Asturiana, Oviedo, pp 249–264
- Madera González M, Tomé Fernández S (1996) La operación ferroviaria y urbanística Cinturón Verde de Oviedo. *Ería* 39–40:124–130 . doi: <https://doi.org/10.17811/er.0.1996.124-130>
- Martínez Fernández LC, Mínguez González S (2005) Las Cuencas Mineras de Asturias, readaptación y desarrollo. *Polígonos Rev Geogr* 15:37–63
- Maside MI (2013) Algunas aportaciones de los participantes (Resumen e intervención). In: Alonso Ibáñez MR, Fernández García A, Herrán Alonso M, et al. (eds) *Regeneración urbanística y territorial integrada*. Grupo de Estudios Jurídico-Sociales sobre Territorio y Desarrollo Sostenible, Langreo, pp 71–90
- Maurín Álvarez M (2011) El desorden territorial en el área central de Asturias y la responsabilidad de la administración autonómica. In: Marco Molina JA, González Pérez V (eds) *Urbanismo expansivo: de la utopía a la realidad: comunicaciones: XXII Congreso de Geógrafos Españoles*, Universidad de Alicante. Asociación de Geógrafos Españoles, Alicante, pp 403–414
- Maurín Álvarez M (1992a) El Territorio Asturiano en el Marco Socioeconómico. In: Morales Matos G (ed) *Geografía de Asturias*. Tomo I. Editorial Prensa Asturiana, Oviedo, pp 64–80
- Maurín Álvarez M (2010) Minería y Energía. In: Fernández Cuesta G, Quirós Linares F (eds) *Átlas Temático de España*. Tomo IV. Minería y Energía. Industria. Comercio y Turismo. Ediciones Nobel, Oviedo, pp 9–111
- Maurín Álvarez M (1992b) El Hábitat en Asturias. In: Morales Matos G (ed) *Geografía de Asturias*. Tomo I. Editorial Prensa Asturiana, Oviedo, pp 193–208
- Méndez García B, Ortega Montequín M (2013) Ciudad difusa y territorio: el caso del Área Central Asturiana. *Ciudad Rev del Inst Urbanística la Univ Valladolid* 16:131–144
- Ministerio de Vivienda (2004) Atlas Estadístico de las Áreas Urbanas en España 2004

- Ministerio de Vivienda (2006) Atlas Estadístico de las Áreas Urbanas en España 2006
- Mora Bongera F (2012) Usos industriales y sus exigencias territoriales. In: Alonso Ibáñez MR, Pérez Fernández JM (eds) Espacio metropolitano y difusión urbana: su incidencia en el medio rural, Oviedo. Consejo Económico y Social del Principado de Asturias, pp 197–217
- Morales Matos G, Alvargonzález Rodríguez R (1990) El Hábitat Urbano de Asturias (I). Los Procesos Históricos de Articulación Territorial. In: Fernández Conde FJ (ed) Historia de Asturias III. La Modernidad. Editorial Prensa Asturiana, Oviedo, pp 669–694
- Morales Matos G, Méndez García B (1992) Avilés. In: Morales Matos G (ed) Geografía de Asturias. Tomo III. Editorial Prensa Asturiana, Oviedo, pp 212–232
- Moro Vallina M (2007) Oviedo detrás de la fachada. Cambalache, Oviedo
- Murcia Navarro E (1977) Efectos de la industrialización de Avilés y Gijón sobre las poblaciones de Luanco y Candás. Un ejemplo de integración en Área Metropolitana. In: Ciudad e Industria. IV Coloquio sobre Geografía. Oviedo, pp 120–138
- Murcia Navarro E (1980) Introducción al estudio del sistema urbano asturiano. *Ería* 1:89–150 . doi: <https://doi.org/10.17811/er.0.1980.89-150>
- Obeso Muñiz Í, Fernández García F (2017) Recent urban development in Gijón (Spain). Historic aerial photography as a tool for sustainability assessment of the process. *Cities* 67:1–8 . doi: 10.1016/j.cities.2017.04.009
- Ortega Montequín M (2017) Vocación funcional en la conformación del área metropolitana central de Asturias. In: Allende Álvarez F, Cañada Torrecilla R, Fernández-Mayorales G, et al. (eds) XXV Congreso de la AGE. 50 Años de Congresos de Geografía. Naturaleza, territorio y ciudad en un mundo global. Madrid, 25 al 27 de octubre de 2017. pp 1295–1304
- Pérez JA, Martínez E (1974) Un ensayo de exposición y aplicación del modelo de Reilly en la Zona Central de Asturias
- Prada Trigo J (2011a) Las políticas de revitalización urbana en ciudades intermedias de tradición minero-industrial: incidencia de los actores locales. Fundación Alternativas
- Prada Trigo J (2011b) Desarrollo, patrimonio y políticas de revitalización en ciudades intermedias de especialización minero-industrial. El caso de Langreo (Asturias). Consejo Económico y Social del Principado de Asturias, Oviedo
- Prada Trigo J (2012) Declive urbano de las ciudades españolas de tamaño intermedio: algunas aproximaciones al papel de los actores locales en las estrategias de revitalización. Universidad Complutense de Madrid
- Presidencia del Gobierno (1969) Orden por la que se fija la delimitación de los Polos de Desarrollo Industrial de Córdoba, Oviedo y Logroño. *BOE* 77:4653–4654
- Quirós Linares F (1980) Presentación. *Ería* 1:3–4 . doi: <https://doi.org/10.17811/er.0.1980.3-4>
- Quirós Linares F (ed) (1982) Geografía de Asturias. Ayalga, Salinas, Asturias
- Rodríguez Gutiérrez F, Carrero de Roa M (2013) Ciudad Astur, una singularidad metropolitana. *Ciudad y Territ Estud Territ* 176:333–350
- Rodríguez Gutiérrez F, Menéndez Fernández R (2005) Geografía de Asturias: la reestructuración territorial de una región de tradición industrial. Ariel, Barcelona
- Rodríguez Gutiérrez F, Menéndez Fernández R (1999) La Ciudad Astur. Un espacio proyecto en el Arco Atlántico. *Ería* 50:265–278 . doi: <https://doi.org/10.17811/er.0.1999.265-278>
- Rodríguez Gutiérrez F, Menéndez Fernández R (2000) La ciudad en la región: “Ciudad Astur”, una hipótesis práctica necesaria. *Abaco Rev Cult y ciencias Soc* 23:70–81
- Rodríguez Gutiérrez F, Menéndez Fernández R (2003) La comarca del Nalón en su contexto metropolitano. La Ciudad Lineal del Nalón en Ciudad Astur. *Ería* 60:55–87 . doi: <https://doi.org/10.17811/er.0.2003.55-87>
- Rodríguez Gutiérrez F, Menéndez Fernández R (2010) La estrategia del desarrollo de la Europa Atlántica: España en el proyecto SDEA. *Boletín la Asoc Geógrafos Españoles* 52:213–243
- Rodríguez Gutiérrez F, Menéndez Fernández R, Blanco Fernández J (2009) El área metropolitana de Asturias. Ciudad Astur: el nacimiento de una estrella urbana en Europa. Trea, Oviedo

- Rodríguez Gutiérrez F, Menéndez Fernández R, Fernández Prieto JA (2013) Las villas en el sistema territorial asturiano. *Eria* 90:31–54
- Rubiera Morollón F, Viñuela Jiménez A (2012) Potencialidades económicas del área central de Asturias: aproximación teórica y revisión de las evidencias empíricas. In: Alonso Ibáñez M rosario, Pérez Fernández JM (eds) *Espacio metropolitano y difusión urbana: su incidencia en el medio rural*. Consejo Económico y Social del Principado de Asturias, Oviedo, pp 103–134
- Ruiz de la Peña JI (1981) *Las polas asturianas en la Edad Media: estudio y diplomático*. Universidad de Oviedo. Departamento de Historia Medieval, Oviedo
- Sánchez-Moral S, Méndez R, Prada-Trigo J (2015) Resurgent Cities: Local Strategies and Institutional Networks to Counteract Shrinkage in Avilés (Spain). *Eur Plan Stud* 23:33–52 . doi: 10.1080/09654313.2013.820084
- Sendín García MÁ (1990) Incidencia de la crisis industrial en el paisaje urbano de Gijón. *Eria* 22:184–188 . doi: <https://doi.org/10.17811/er.0.1990.184-188>
- Suárez C, Quirós Linares F (1977) *La función universitaria de Oviedo*. Departamento de Geografía de la Universidad de Oviedo, Oviedo
- Tomé Fernández S (1988) *Oviedo, la formación de la ciudad burguesa, 1850-1950*. Colegio Oficial de Arquitectos de Asturias, Oviedo
- Tomé Fernández S (1992) El concejo de Oviedo. In: Morales Matos G (ed) *Geografía de Asturias*. Tomo III. Editorial Prensa Asturiana, Oviedo, pp 129–144
- Tomé Fernández S (2010) Langreo, Mieres, Ponferrada, Puertollano: cambios funcionales y morfológicos en ciudades minero industriales. *Scr Nov* 14:323–339
- Tomé Fernández S (1999) La nueva Geografía Económica de Asturias. *Eria* 50:245–263 . doi: <https://doi.org/10.17811/er.0.1999.245-263>

Chapter 3

- Bradley A V., Rosa IMD, Pontius Jr. RG, et al (2016) SimiVal, a multi-criteria map comparison tool for land-change model projections. *Environ Model Softw* 82:229–240 . doi: 10.1016/j.envsoft.2016.04.016
- Büttner G (2014) CORINE Land Cover and Land Cover Change Products. In: Manakos I, Braun M (eds) *Land Use and Land Cover Mapping in Europe: Practices & Trends*. Springer, Dordrecht, Heidelberg, New York, London, pp 55–74
- Eastman JR (2015) *TerrSet Manual*. Clark University
- Eastman JR, Toledano J (2018a) A Short Presentation of CA_MARKOV. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 481–484
- Eastman JR, Toledano J (2018b) A Short Presentation of the Land Change Modeler (LCM). In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 499–505
- Feranec J (2016) Project CORINE Land Cover. In: Feranec J, Soukup T, Hazeu G, Jaffrain G (eds) *European Landscape Dynamics. CORINE Land Cover Data*. CRC Press, Boca Raton, pp 9–14
- Hewitt R, Díaz-Pacheco J (2017) Stable models for metastable systems? Lessons from sensitivity analysis of a Cellular Automata urban land use model. *Comput Environ Urban Syst* 62:113–124 . doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2016.10.011
- Jayne Dablin L (2014) *Assessing the drivers of Forest Loss in Madre de Dios, Perú*. Imperial College London
- Li H, Reynolds JF (1993) A new contagion index to quantify spatial patterns of landscapes. *Landsc Ecol* 8:155–162 . doi: 10.1007/BF00125347
- Paegelow M, Camacho Olmedo MT, Mas J-F (2018) Techniques for the validation of LUCC modeling outputs. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 53–80

- Pontius Jr. RG, Huffaker D, Denman K (2004) Useful techniques of validation for spatially explicit land-change models. *Ecol Modell* 179:445–461 . doi: 10.1016/j.ecolmodel.2004.05.010
- RIKS (2012) *Metronamica Documentation*. Maastricht
- Rodrigues H, Soares-Filho B (2018) A Short Presentation of Dinamica EGO. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 493–498
- Soares-Filho B, Rodrigues H, Costa W (2009) Modeling environmental dynamics with Dinamica EGO. *Belo Horizonte*
- Van Delden H, Vanhout R (2018) A Short Presentation of Metronamica. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 511–519
- Van Vliet J, Bregt AK, Hagen-Zanker A (2011) Revisiting Kappa to account for change in the accuracy assessment of land-use change models. *Ecol Modell* 222:1367–1375 . doi: 10.1016/j.ecolmodel.2011.01.017
- White R, Engelen G, Uljee I (1997) The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land-use dynamics. *Environ Plan B Plan Des* 24:323–343 . doi: 10.1068/b240323

Chapter 4

- Abolhasani S, Taleai M, Karimi M, Rezaee Node A (2016) Simulating urban growth under planning policies through parcel-based cellular automata (ParCA) model. *Int J Geogr Inf Sci* 8816:1–26 . doi: 10.1080/13658816.2016.1184271
- Agarwal C, Green GM, Grove JM, et al (2002) A review and assessment of land-use change models: dynamics of space, time, and human choice. *Newtown*
- Aguilera Benavente F (2008) *Análisis espacial paa la ordenación eco-paisajística de la Aglomeración Urbana de Granada*. Universidad de Granada
- Altartouri A, Nurminen L, Jolma A (2015) Spatial neighborhood effect and scale issues in the calibration and validation of a dynamic model of *Phragmites australis* distribution - A cellular automata and machine learning approach. *Environ Model Softw* 71:15–29 . doi: 10.1016/j.envsoft.2015.04.010
- Barredo JI, Kasanko M, McCormick N, Lavallo C (2003) Modelling dynamic spatial processes: simulation of urban future scenarios through cellular automata. *Landsc Urban Plan* 64:145–160 . doi: 10.1016/S0169-2046(02)00218-9
- Benenson I, Torrens PM (2004) *Geosimulation: object-based modeling of urban phenomena*. Wiley, West Sussex, England
- Bradley A V., Rosa IMD, Pontius Jr. RG, et al (2016) SimiVal, a multi-criteria map comparison tool for land-change model projections. *Environ Model Softw* 82:229–240 . doi: 10.1016/j.envsoft.2016.04.016
- Brandt J, Primdahl J, Reenberg A (1999) Rural land-use and dynamic forces – analysis of “driving forces” in space and time. In: Krönert R, Baudry J, Bowler II, Reenberg A (eds) *Land-use changes and their environmental impact in rural areas in Europe*. UNESCO, Paris, pp 81–102
- Brown DG, Verburg PH, Pontius Jr. RG, Lange MD (2013) Opportunities to improve impact, integration, and evaluation of land change models. *Curr Opin Environ Sustain* 5:452–457 . doi: 10.1016/j.cosust.2013.07.012
- Brown DG, Walker R, Manson S, Seto K (2004) Modeling Land-Use and Land-Cover Change. In: Gutman G, Janetos AC, Justice CO, et al. (eds) *Land Change Science. Observing, Monitoring and Understanding Trajectories of Change on the Earth’s Surface*. Springer, Dordrecht, The Netherlands, pp 395–409
- Camacho Olmedo MT, Mas J-F (2018) Markov Chain. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 441–445

- Camacho Olmedo MT, Mas J-F, Paegelow M (2018a) The simulation stage in LUCC modeling. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 27–51
- Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F (2013) Interest in intermediate soft-classified maps in land change model validation: suitability versus transition potential. *Int J Geogr Inf Sci* 27:2343–2361 . doi: 10.1080/13658816.2013.831867
- Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (2018b) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland
- Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (2018c) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios: An Introduction*. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 1–8
- Campbell JB, Wynne RH (2011) *Introduction to remote sensing*, 5 edition. The Guilford Press, New York, London
- Clarke KC (2018) Land Use Change modeling with SLEUTH: Improving Calibration with a Genetic Algorithm. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland
- Clarke KC (2004) The limits of simplicity: toward geocomputational honesty in urban modeling. In: Atkinson P, Foody G, Darby S, Wu F (eds) *Geodynamics*. CRC Press, Boca Raton, pp 215–232
- Coquillard P, Hill D (1997) *Modélisation et simulation d'écosystèmes. Des modèles déterministes aux simulations à événements discrets*. Masson, Paris
- Crooks AT, Heppenstall AJ (2012) Introduction to agent-based modelling. In: Heppenstall A., Crooks AT, See LM, Batty M (eds) *Agent-Based Models of Geographical Systems*. Springer, Dordrecht, Heidelberg, London, New York, pp 85–105
- Dietzel C, Clarke KC (2006) The effect of disaggregating land use categories in cellular automata during model calibration and forecasting. *Comput Environ Urban Syst* 30:78–101 . doi: 10.1016/j.compenvurb-sys.2005.04.001
- Eastman JR, Toledano J (2018) A Short Presentation of the Land Change Modeler (LCM). In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 499–505
- Elsawah S, Pierce SA, Hamilton SH, et al (2017) An overview of the system dynamics process for integrated modelling of socio-ecological systems: Lessons on good modelling practice from five case studies. *Environ Model Softw* 93:127–145 . doi: 10.1016/j.envsoft.2017.03.001
- Escobar F, Van Delden H, Hewitt R (2018) LUCC Scenarios. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 81–97
- Gallardo M (2014) *Cambios de usos del suelo y simulación de escenarios en la Comunidad de Madrid*. Universidad Complutense de Madrid
- García AM, Santé I, Crecente R, Miranda D (2011) An analysis of the effect of the stochastic component of urban cellular automata models. *Comput Environ Urban Syst* 35:289–296 . doi: 10.1016/j.compenvurb-sys.2010.11.001
- Hagen-Zanker A (2006) *Comparing continuous valued raster data. A cross disciplinary literature scan*. Maas-tricht
- Herold M, Couclelis H, Clarke KC (2005) The role of spatial metrics in the analysis and modeling of urban land use change. *Comput Environ Urban Syst* 29:369–399 . doi: 10.1016/j.compenvurb-sys.2003.12.001
- Jakeman AJ, Letcher RA, Norton JP (2006) Ten iterative steps in development and evaluation of environmental models. *Environ Model Softw* 21:602–614 . doi: 10.1016/j.envsoft.2006.01.004
- Koomen E, Stillwell J (2007) *Modelling Land-Use Change. Theories and Methods*. In: Eric K, John S, Aldrik B, Scholten HJ (eds) *Modelling Land-use Change: Progress and Applications*. Springer, Dordrecht, The Netherlands, pp 1–22
- Leao S, Bishop I, Evans D (2004) Simulating Urban Growth in a Developing Nation's Region Using a Cellular Automata-Based Model. *J urban Plan Dev* 130:145–158

- Magliocca NR, Van Vliet J, Brown C, et al (2015) From meta-studies to modeling: Using synthesis knowledge to build broadly applicable process-based land change models. *Environ Model Softw* 72:10–20 . doi: 10.1016/j.envsoft.2015.06.009
- Mas J-F, Kolb M, Paegelow M, et al (2014) Inductive pattern-based land use/cover change models: A comparison of four software packages. *Environ Model Softw* 51:94–111 . doi: 10.1016/j.envsoft.2013.09.010
- Mas J-F, Paegelow M, Camacho Olmedo MT (2018) LUCC modeling approaches to calibration. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 1–15
- Mustafa A, Saadi I, Cools M, Teller J (2014) Measuring the Effect of Stochastic Perturbation Component in Cellular Automata Urban Growth Model. *Procedia Environ Sci* 22:156–168 . doi: 10.1016/j.pro-env.2014.11.016
- National Research Council (2014) *Advancing Land Change Modeling: Opportunities and Research Requirements*. National Academies Press, Washington, D.C.
- North MJ, Macal CM (2007) *Managing Business Complexity: Discovering Strategic Solutions with Agent-Based Modeling and Simulation*. Oxford University Press, New York
- O’Sullivan D, Perry GLW (2013) *Spatial Simulation: Exploring Pattern and Process*. Wiley, Chichester
- Olaya V (2014) *Sistemas de Información Geográfica*
- Paegelow M, Camacho Olmedo MT (2008) Advances in geomatic simulations for environmental dynamics. In: Paegelow M, Camacho Olmedo MT (eds) *Modelling Environmental Dynamics*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp 3–54
- Paegelow M, Camacho Olmedo MT (2005) Possibilities and limits of prospective GIS land cover modeling—a compared case study: Garrotxes (France) and Alta Alpujarra Granadina (Spain). *Int J Geogr Inf Sci* 19:697–722 . doi: 10.1080/13658810500076443
- Paegelow M, Camacho Olmedo MT, Houet T, et al (2013) Land change modeling: moving beyond projections. *Int J Geogr In- Form Sci* 27:1691–1695 . doi: https://doi.org/10.1080/13658816.2013.819104
- Paegelow M, Camacho Olmedo MT, Mas J-F (2018) Techniques for the validation of LUCC modeling outputs. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 53–80
- Paegelow M, Camacho Olmedo MT, Mas J-F, Houet T (2014) Benchmarking of LUCC modelling tools by various validation techniques and error analysis. *Cybergegeo*. doi: 10.4000/cybergegeo.26610
- Pérez-Hoyos A, García-Haro FJ (2009) Análisis Comparativo de las Principales Cartografías de Coberturas del Suelo en la Península Ibérica. In: Montesinos Aranda S, Fernández Fornos L (eds) *Teledetección: Agua y desarrollo sostenible. XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección*. Geosys, Calatayud, pp 209–212
- Perry GLW (2009) Modelling and simulation. In: Castree N, Demeritt D, Liverman D, Rhoads B (eds) *A Companion to Environmental Geography*. Wiley, Chichester, pp 336–356
- Pontius Jr. RG, Huffaker D, Denman K (2004) Useful techniques of validation for spatially explicit land-change models. *Ecol Modell* 179:445–461 . doi: 10.1016/j.ecolmodel.2004.05.010
- Pontius Jr. RG, Malanson J (2005) Comparison of the structure and accuracy of two land change models. *Int J Geogr Inf Sci* 19:243–265 . doi: 10.1080/13658810410001713434
- Rykiel EJ (1996) Testing ecological models: The meaning of validation. *Ecol Modell* 90:229–244 . doi: 10.1016/0304-3800(95)00152-2
- Santé I, García AM, Miranda D, Crecente R (2010) Cellular automata models for the simulation of real-world urban processes: A review and analysis. *Landsc Urban Plan* 96:108–122 . doi: 10.1016/j.landurbplan.2010.03.001
- Schmit C, Rounsevell MDA, La Jeunesse I (2006) The limitations of spatial land use data in environmental analysis. *Environ Sci Policy* 9:174–188 . doi: 10.1016/j.envsci.2005.11.006
- Shafizadeh-Moghadam H, Asghari A, Tayyebi A, Taleai M (2017) Coupling machine learning, tree-based and statistical models with cellular automata to simulate urban growth. *Comput Environ Urban Syst* 64:297–308 . doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2017.04.002

- Soares-Filho BS, Cerqueira GC, Pennachin CL, et al (2002) DINAMICA - a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *Ecol Modell* 154:217–235 . doi: 10.1016/S0304-3800(02)00059-5
- Sohl TL, Claggett PR (2013) Clarity versus complexity: Land-use modeling as a practical tool for decision-makers. *J Environ Manage* 129:235–243 . doi: 10.1016/j.jenvman.2013.07.027
- Toro Balbotín D (2014) Analyse de la détérioration de la forêt de la cordillère de la Costa dans le sud chilien: géomatique et modélisation prospective appliquée sur une forêt patrimoniale de la province d’Osorno (41° 15’ - 41° 00’ latitude Sud). Université Toulouse 2 Le Mirail. Laboratoire GEODE
- Torrens PM (2011) Calibrating and Validating Cellular Automata Models of Urbanization. In: Yang X (ed) *Urban Remote Sensing: Monitoring, Synthesis and Modeling in the Urban Environment*. Wiley, pp 335–345
- Unwin DJ (1996) GIS, spatial analysis and spatial statistics. *Prog Hum Geogr* 20:540–551 . doi: 10.1177/030913259602000408
- Valcárcel Sanz N, Castaño Fernández S (2012) Cartografía de ocupación del suelo en España. Proyecto SI-OSE. CNIG, Madrid
- Van Delden H, Seppelt R, White R, Jakeman AJ (2011) A methodology for the design and development of integrated models for policy support. *Environ Model Softw* 26:266–279 . doi: 10.1016/j.envsoft.2010.03.021
- Van Delden H, Vanhout R (2018) A Short Presentation of Metronamica. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 511–519
- Van Schrojenstein Lantman J, Verburg PH, Bregt A, Geertman S (2011) Core Principles and Concepts in Land-Use Modelling: A Literature Review. In: Koomen E, Borsboom-Van Beurden J (eds) *Land-Use Modelling in Planning Practice*. Springer, Dordrecht, Heidelberg, London, New York, pp 35–57
- Van Vliet J, Bregt AK, Brown DG, et al (2016) A review of current calibration and validation practices in land-change modeling. *Environ Model Softw* 82:174–182 . doi: 10.1016/j.envsoft.2016.04.017
- Van Vliet J, Bregt AK, Hagen-Zanker A (2011) Revisiting Kappa to account for change in the accuracy assessment of land-use change models. *Ecol Modell* 222:1367–1375 . doi: 10.1016/j.ecolmodel.2011.01.017
- Verburg PH, Kok K, Pontius Jr. RG, Veldkamp A (2006) Modeling Land-Use and Land-Cover Change. Local Processes and Global Impacts. In: Lambin EF, Geist H (eds) *Land-Use and Land-Cover Change*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp 117–135
- Verburg PH, Neumann K, Nol L (2011) Challenges in using land use and land cover data for global change studies. *Glob Chang Biol* 17:974–989 . doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02307.x
- Wainwright J, Mulligan M (2013) *Environmental Modelling: Finding Simplicity in Complexity*, 2 edition. Wiley, Chichester
- Walker WE, Harremoës P, Rotmans J, et al (2003) Defining Uncertainty: A Conceptual Basis for Uncertainty Management in Model-Based Decision Support. *Integr Assess* 4:5–17 . doi: <https://doi.org/10.1076/iaij.4.1.5.16466>
- Wang F, Marceau DJ (2013) A patch-based cellular automaton for simulating land-use changes at fine spatial resolution. *Trans GIS* 17:828–846 . doi: 10.1111/tgis.12009
- White R, Engelen G (1993) Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns. *Environ Plan A* 25:1175–1199 . doi: 10.1068/a251175
- White R, Engelen G, Uljee I (2015) *Modeling cities and regions as complex systems: from theory to planning applications*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England

Chapter 5

- Aldwaik SZ, Onsted JA, Pontius Jr. RG (2015) Behavior-based aggregation of land categories for temporal change analysis. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 35:229–238 . doi: 10.1016/j.jag.2014.09.007

- Ascough JC, Maier HR, Ravalico JK, Strudley MW (2008) Future research challenges for incorporation of uncertainty in environmental and ecological decision-making. *Ecol Modell* 219:383–399 . doi: 10.1016/j.ecolmodel.2008.07.015
- Aspinall RJ, Pearson DM (1995) Describing and managing uncertainty of categorical maps in GIS. In: Fisher P (ed) *Innovations In GIS 2*. Taylor & Francis, London, Bristol, pp 71–83
- Batisani N, Yarnal B (2009) Uncertainty awareness in urban sprawl simulations: Lessons from a small US metropolitan region. *Land use policy* 26:178–185 . doi: 10.1016/j.landusepol.2008.01.013
- Bolliger J, Schmatz D, Pazúr R, et al (2017) Reconstructing forest-cover change in the Swiss Alps between 1880 and 2010 using ensemble modelling. *Reg Environ Chang* 17:2265–2277 . doi: 10.1007/s10113-016-1090-4
- Botterweg P (1995) The user's influence on model calibration results: an example of the model SOIL, independently calibrated by two users. *Ecol Modell* 81:71–81 . doi: 10.1016/0304-3800(94)00161-A
- Bradley A V., Rosa IMD, Pontius Jr. RG, et al (2016) SimiVal, a multi-criteria map comparison tool for land-change model projections. *Environ Model Softw* 82:229–240 . doi: 10.1016/j.envsoft.2016.04.016
- Brown JD (2004) Knowledge, uncertainty and physical geography: towards the development of methodologies for questioning belief. *Trans Inst Br Geogr* 24:367–381 . doi: 10.1111/j.0020-2754.2004.00342.x
- Burnicki AC, Brown DG, Goovaerts P, et al (2010) Propagating error in land-cover-change analyses: impact of temporal dependence under increased thematic complexity. *Int J Geogr Inf Sci* 24:1043–1060 . doi: 10.1080/13658810903279008
- Castilla G, Hay GJ (2007) Uncertainties in land use data. *Hydrol Earth Syst Sci* 11:1857–1868 . doi: 10.5194/hess-11-1857-2007
- Chuvieco E (2016) *Fundamentals of Satellite Remote Sensing. An environmental approach*, 2 edition. CRC Press, Boca Raton
- Congalton RG (1997) Exploring and Evaluating the Consequences of Vector-to-Raster and Raster-to-Vector Conversion. *Photogramm Eng Remote Sens* 63:425–434
- Congalton RG, Fenstermaker LK, John R, Mcgwire KC (1991) Remote Sensing and Geographic Information System Data Integration: Error Sources and Research Issues. *Photogramm Eng Remote Sens* 57:677–687
- Conway TM (2009) The impact of class resolution in land use change models. *Comput Environ Urban Syst* 33:269–277 . doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2009.02.001
- Dendoncker N, Schmit C, Rounsevell M (2008) Exploring spatial data uncertainties in land use change scenarios. *Int J Geogr Inf Sci* 22:1013–1030 . doi: 10.1080/13658810701812836
- Díaz-Pacheco J, Van Delden H, Hewitt R (2018) The importance of scale in land use models: experiments in data conversion, data resampling, resolution and neighbourhood extent. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 163–186
- Dunn WN (2001) Using the method of context validation to mitigate type III error in environmental policy analysis. In: Hisschemöller M, Hoppe R, Dunn WN, Ravetz JR (eds) *Knowledge, power and participation in environmental policy analysis*. Taylor & Francis, New York, pp 417–436
- Elsawah S, Pierce SA, Hamilton SH, et al (2017) An overview of the system dynamics process for integrated modelling of socio-ecological systems: Lessons on good modelling practice from five case studies. *Environ Model Softw* 93:127–145 . doi: 10.1016/j.envsoft.2017.03.001
- Ferchichi A, Boulila W, Farah IR (2017) Reducing uncertainties in land cover change models using sensitivity analysis. *Knowl Inf Syst*. doi: 10.1007/s10115-017-1102-9
- García-Álvarez D (2018) The influence of scale in LULC modelling. A comparison between two different LULC maps (SIOSE and CORINE). In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 187–213
- García-Álvarez D, Camacho Olmedo MT (2017) Changes in the methodology used in the production of the Spanish CORINE: Uncertainty analysis of the new maps. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 63:55–67 . doi: 10.1016/j.jag.2017.07.001

- García Martínez ED, Chas-Amil ML, Touza J (2015) Assessment of the Spanish land cover information to estimate forest area in Galicia. *Boletín la Asoc Geógrafos Españoles* 69:333–350
- Gómez Delgado M, Barredo JI (2006) *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*, 2 edition. Ra-Ma, Madrid
- Gómez Delgado M, Bosque Sendra J (2004) Aplicación de análisis de incertidumbre como método de validación y control del riesgo en la toma de decisiones. *GeoFocus* 4:179–208
- Goodchild MF (1991) Issues of quality and uncertainty. In: Muller J-C (ed) *Advances in Cartography*. International Cartographic Association, Elsevier Applied Science, London, New York, pp 17–42
- Grinblat Y, Gilichinsky M, Benenson I (2016) Cellular Automata Modeling of Land-Use/Land-Cover Dynamics: Questioning the Reliability of Data Sources and Classification Methods. *Ann Am Assoc Geogr* 106:1299–1320 . doi: 10.1080/24694452.2016.1213154
- Hagen A (2003) Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. *Int J Geogr Inf Sci* 17:235–249 . doi: 10.1080/13658810210157822
- Hewitt R, Van Delden H, Escobar F (2014) Participatory land use modelling, pathways to an integrated approach. *Environ Model Softw* 52:149–165 . doi: 10.1016/j.envsoft.2013.10.019
- Hunter G (2005) Managing uncertainty in GIS. In: Longley PA, Goodchild MF, Maguire DJ, Rhind DW (eds) *Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications*. Wiley, pp 633–641
- Jafarnejhad J, Salmanmahiny A, Sakieh Y (2012) Subjectivity versus Objectivity: Comparative Study between Brute Force Method and Genetic Algorithm for Calibrating the SLEUTH Urban Growth Model. *J Urban Plan Dev* 142:1–12 . doi: 10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000307.
- Kemp KK (ed) (2008) *Encyclopedia of geographic information science*. SAGE Publications, Waimea, Hawaii
- Klein Goldewijk K, Verburg PH (2013) Uncertainties in global-scale reconstructions of historical land use: An illustration using the HYDE data set. *Landsc Ecol* 28:861–877 . doi: 10.1007/s10980-013-9877-x
- Klir G, Wierman M (1999) *Uncertainty-based information: elements of generalized information theory*, 2 edition. Springer, Berlin, Heidelberg
- Klopprogge P, Van der Sluijs JP, Wardekker JA (2007) *Uncertainty Communication. Issues and good practice*. Utrecht
- Lee DB (1973) Requiem for Large-Scale Models. *J. Am. Inst. Plann.* 39:163–178
- Li H, Wu J (2006) Uncertainty analysis in ecological studies: an overview. In: Wu J, Jones KB, Li H, Loucks OL (eds) *Scaling and Uncertainty Analysis in Ecology: Methods and Applications*. Springer, Dordrecht, pp 45–66
- Lloyd CD (2014) *Exploring Spatial Scale in Geography*. Wiley, Chichester
- Mahmoud M, Liu Y, Hartmann H, et al (2009) A formal framework for scenario development in support of environmental decision-making. *Environ Model Softw* 24:798–808 . doi: 10.1016/j.envsoft.2008.11.010
- Matott LS, Babendreier JE, Purucker ST (2009) Evaluating uncertainty in integrated environmental models: A review of concepts and tools. *Water Resour Res* 45:1–14 . doi: 10.1029/2008WR007301
- Ménard A, Marceau DJ (2005) Exploration of spatial scale sensitivity in geographic cellular automata. *Environ Plan B Plan Des* 32:693–714 . doi: 10.1068/b31163
- National Research Council (2014) *Advancing Land Change Modeling: Opportunities and Research Requirements*. National Academies Press, Washington, D.C.
- Openshaw S (1989) Learning to live with errors in spatial databases. In: Goodchild MF, Gopal S (eds) *Accuracy of spatial databases*. Taylor & Francis, London, pp 263–276
- Paegelow M, Camacho Olmedo MT, Mas J-F, Houet T (2014) Benchmarking of LUCC modelling tools by various validation techniques and error analysis. *Cybergeog*. doi: 10.4000/cybergeog.26610
- Pontius Jr. RG, Huffaker D, Denman K (2004) Useful techniques of validation for spatially explicit land-change models. *Ecol Modell* 179:445–461 . doi: 10.1016/j.ecolmodel.2004.05.010
- Pontius Jr. RG, Lippitt CD (2006) Can Error Explain Map Differences Over Time? *Cartogr Geogr Inf Sci* 33:159–171 . doi: 10.1559/152304006777681706
- Pontius Jr. RG, Millones M (2011) Death to Kappa: birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. *Int J Remote Sens* 32:4407–4429 . doi: 10.1080/01431161.2011.552923

- Pontius Jr RG, Spencer J (2005) Uncertainty in extrapolations of predictive land change models. *Environ Plan B Plan Des* 32:211–230
- Quattrochi DA, Goodchild MF (1997) *Scale in remote sensing and GIS*. CRC Press, Boca Raton
- Recker J (2015) Research on Conceptual Modelling: Less Known Knowns and More Unknown Unknowns, Please. In: *Proceedings of the 11th Asia-Pacific Conference on Conceptual Modelling*, Australian Computer Society. Sydney, pp 3–7
- Reed MS, Challies E, de Vente J, et al (2017) A theory of participation: what makes stakeholder and public engagement in environmental management work? *Restor Ecol* 1–19 . doi: 10.1111/j.1399-0012.2012.01641.x
- Refsgaard JC, Drews M, Jeppesen E, et al (2013) The role of uncertainty in climate change adaptation strategies — A Danish water management example. *Mitig Adapt Strateg Glob Chang* 18:337–359 . doi: 10.1007/s11027-012-9366-6
- Refsgaard JC, Van der Sluijs JP, Højberg AL, Vanrolleghem PA (2007) Uncertainty in the environmental modelling process - A framework and guidance. *Environ Model Softw* 22:1543–1556 . doi: 10.1016/j.envsoft.2007.02.004
- Rosa IMD, Purves D, Carreiras JMB, Ewers RM (2015) Modelling land cover change in the Brazilian Amazon: temporal changes in drivers and calibration issues. *Reg Environ Chang* 15:123–137 . doi: 10.1007/s10113-014-0614-z
- Tayyebi AH, Tayyebi A, Khanna N (2014) Assessing uncertainty dimensions in land-use change models: Using swap and multiplicative error models for injecting attribute and positional errors in spatial data. *Int J Remote Sens* 35:149–170 . doi: 10.1080/01431161.2013.866293
- Torrens PM (2011) Calibrating and Validating Cellular Automata Models of Urbanization. In: Yang X (ed) *Urban Remote Sensing: Monitoring, Synthesis and Modeling in the Urban Environment*. Wiley, pp 335–345
- Uusitalo L, Lehtikoinen A, Helle I, Myrberg K (2015) An overview of methods to evaluate uncertainty of deterministic models in decision support. *Environ Model Softw* 63:24–31 . doi: 10.1016/j.envsoft.2014.09.017
- Van Asselt MBA (2000) *Perspectives on Uncertainty and Risk - the PRIMA Approach to Decision Support*. Kluwer Academic Publishers, Boston, Dordrecht, London
- Van Delden H, Hagen-Zanker A (2009) New Ways of Supporting Decision Making: Linking Qualitative Storylines with Quantitative Modelling. In: Geertman S, Stillwell J (eds) *Planning Support Systems Best Practice and New Methods*. Springer, pp 347–367
- Van Delden H, Seppelt R, White R, Jakeman AJ (2011) A methodology for the design and development of integrated models for policy support. *Environ Model Softw* 26:266–279 . doi: 10.1016/j.envsoft.2010.03.021
- Van Vliet J, Bregt AK, Hagen-Zanker A (2011) Revisiting Kappa to account for change in the accuracy assessment of land-use change models. *Ecol Modell* 222:1367–1375 . doi: 10.1016/j.ecolmodel.2011.01.017
- Verburg PH, Neumann K, Nol L (2011) Challenges in using land use and land cover data for global change studies. *Glob Chang Biol* 17:974–989 . doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02307.x
- Verburg PH, Veldkamp A (2004) Projecting land use transitions at forest in the Philippines at two spatial scales. *Landsc Ecol* 19:77–98 . doi: 10.1023/B:LAND.0000018370.57457.58
- Wainwright J, Mulligan M (2013) *Environmental Modelling: Finding Simplicity in Complexity*, 2 edition. Wiley, Chichester
- Walker WE, Harremoës P, Rotmans J, et al (2003) Defining Uncertainty: A Conceptual Basis for Uncertainty Management in Model-Based Decision Support. *Integr Assess* 4:5–17 . doi: <https://doi.org/10.1076/iaij.4.1.5.16466>
- Wardekker JA, Van der Sluijs JP, Janssen PHM, et al (2008) Uncertainty communication in environmental assessments: views from the Dutch science-policy interface. *Environ Sci Policy* 11:627–641 . doi: 10.1016/j.envsci.2008.05.005

- Warmink JJ, Janssen JAEB, Booij MJ, Krol MS (2010) Identification and classification of uncertainties in the application of environmental models. *Environ Model Softw* 25:1518–1527 . doi: 10.1016/j.envsoft.2010.04.011
- Waser LT, Schwarz M (2006) Comparison of large-area land cover products with national forest inventories and CORINE land cover in the European Alps. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 8:196–207 . doi: 10.1016/j.jag.2005.10.001
- Yeh AG-O, Li X (2003) Uncertainties In Urban Simulation Using Cellular Automata And Gis. In: Proceedings of the 7th International Conference on GeoComputation. Southampton
- Yeh AG-O, Li X (2006) Errors and uncertainties in urban cellular automata. *Comput Environ Urban Syst* 30:10–28 . doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2004.05.007

Chapter 6

- Abolhasani S, Taleai M, Karimi M, Rezaee Node A (2016) Simulating urban growth under planning policies through parcel-based cellular automata (ParCA) model. *Int J Geogr Inf Sci* 8816:1–26 . doi: 10.1080/13658816.2016.1184271
- Ageejdad R, Houet T, Hubert L (2017) Spatial Validation of Land Use Change Models Using Multiple Assessment Techniques: A Case Study of Transition Potential Models. *Environ Model Assess*. doi: 10.1007/s10666-017-9564-4
- Alker HR (1969) A typology of ecological fallacies. In: Dogan M, Rokkan S (eds) *Quantitative ecological analysis in the social sciences*. The MIT Press, Cambridge, pp 69–86
- Altartouri A, Nurminen L, Jolma A (2015) Spatial neighborhood effect and scale issues in the calibration and validation of a dynamic model of *Phragmites australis* distribution - A cellular automata and machine learning approach. *Environ Model Softw* 71:15–29 . doi: 10.1016/j.envsoft.2015.04.010
- Antrop M (2004) Landscape change and the urbanization process in Europe. *Landsc Urban Plan* 67:9–26 . doi: 10.1016/S0169-2046(03)00026-4
- Bach M, Breuer L, Frede HG, et al (2006) Accuracy and congruency of three different digital land-use maps. *Landsc Urban Plan* 78:289–299 . doi: 10.1016/j.landurbplan.2005.09.004
- Bailey RG (1985) The Factor of Scale in Ecosystems Mapping. *Environ Manage* 9:271–276
- Benenson I (2007) Warning! The scale of land-use CA is changing! *Comput Environ Urban Syst* 31:107–113 . doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2007.01.001
- Bernard L, Friis-Christensen A, Pundt H, Hansen HS (2008) Quantifying and Analysing Neighbourhood Characteristics Supporting Urban Land-Use Modelling. *Eur Inf Soc* 283–299 . doi: 10.1007/978-3-540-78946-8_15
- Bhatti SS, Tripathi NK, Nitivattananon V, et al (2015) A multi-scale modeling approach for simulating urbanization in a metropolitan region. *Habitat Int* 50:354–365 . doi: 10.1016/j.habitatint.2015.09.005
- Blanchard SD, Pontius Jr. RG, Urban KM (2015) Implications of Using 2 m versus 30 m Spatial Resolution Data for Suburban Residential Land Change Modeling. *J Environ Informatics* 25:1–13 . doi: 10.3808/jei.201400284
- Brown DG, Verburg PH, Pontius Jr. RG, Lange MD (2013) Opportunities to improve impact, integration, and evaluation of land change models. *Curr Opin Environ Sustain* 5:452–457 . doi: 10.1016/j.cosust.2013.07.012
- Camacho Olmedo MT (2018) Obtaining and Comparing Factors in Land Change Models Using One or Two Time Points Based Calibration. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 101–120
- Camacho Olmedo MT, Mas J-F, Paegelow M (2018) The simulation stage in LUCC modeling. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 27–51

- Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F (2013) Interest in intermediate soft-classified maps in land change model validation: suitability versus transition potential. *Int J Geogr Inf Sci* 27:2343–2361 . doi: 10.1080/13658816.2013.831867
- Cao C, Siu-Ngan Lam N (1997) Understanding the Scale and Resolution Effects in Remote Sensing and GIS. In: Quattrochi DA, Goodchild MF (eds) *Scale in Remote Sensing and GIS*. CRC press, Boca Raton, pp 57–72
- Castilla G, Hay GJ (2007) Uncertainties in land use data. *Hydrol Earth Syst Sci* 11:1857–1868 . doi: 10.5194/hess-11-1857-2007
- Chen H, Pontius Jr. RG (2011) Sensitivity of a Land Change Model to Pixel Resolution and Precision of the Independent Variable. *Environ Model Assess* 16:37–52 . doi: 10.1007/s10666-010-9233-3
- Chen Y, Li X, Liu X, Ai B (2013) Modeling urban land-use dynamics in a fast developing city using the modified logistic cellular automaton with a patch-based simulation strategy. *Int J Geogr Inf Sci* 28:234–255 . doi: 10.1080/13658816.2013.831868
- Clarke KC (2004) The limits of simplicity: toward geocomputational honesty in urban modeling. In: Atkinson P, Foody G, Darby S, Wu F (eds) *Geodynamics*. CRC Press, Boca Raton, pp 215–232
- Congalton RG (1997) Exploring and Evaluating the Consequences of Vector-to-Raster and Raster-to-Vector Conversion. *Photogramm Eng Remote Sens* 63:425–434
- Conway TM (2009) The impact of class resolution in land use change models. *Comput Environ Urban Syst* 33:269–277 . doi: 10.1016/j.compenvurbysys.2009.02.001
- Costanza R (1989) Model goodness of fit: A multiple resolution procedure. *Ecol Modell* 47:199–215 . doi: 10.1016/0304-3800(89)90001-X
- Couclelis H (2005) Space, time, geography. In: Longley PA, Goodchild MF, Maguire DJ, Rhind DW (eds) *Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications*. Wiley, pp 29–38
- Couclelis H (1997) From cellular automata to urban models: new principles for model development and implementation. *Environ Plan B Plan Des* 24:165–174 . doi: 10.1068/b240165
- Dendoncker N, Schmit C, Rounsevell M (2008) Exploring spatial data uncertainties in land use change scenarios. *Int J Geogr Inf Sci* 22:1013–1030 . doi: 10.1080/13658810701812836
- Díaz-Pacheco J, Van Delden H, Hewitt R (2018) The importance of scale in land use models: experiments in data conversion, data resampling, resolution and neighbourhood extent. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 163–186
- Dietzel C, Clarke KC (2004a) Replication of Spatio-temporal Land Use Patterns at Three Levels of Aggregation by an Urban Cellular Automata. In: Sloat PMA, Chopard B, Hoekstra AG (eds) *6th International Conference on Cellular Automata for Research and Industry, ACRI 2004*. Springer, Amsterdam, pp 523–532
- Dietzel C, Clarke KC (2004b) Spatial differences in multi-resolution urban automata modeling. *Trans GIS* 8:479–492 . doi: 10.1111/j.1467-9671.2004.00197.x
- Dietzel C, Clarke KC (2006) The effect of disaggregating land use categories in cellular automata during model calibration and forecasting. *Comput Environ Urban Syst* 30:78–101 . doi: 10.1016/j.compenvurbysys.2005.04.001
- Dungan JL, Perry JN, Dale MRT, et al (2002) A balanced view of scale in spatial statistical analysis. *Ecography (Cop)* 25:626–640 . doi: 10.1034/j.1600-0587.2002.250510.x
- Elsawah S, Pierce SA, Hamilton SH, et al (2017) An overview of the system dynamics process for integrated modelling of socio-ecological systems: Lessons on good modelling practice from five case studies. *Environ Model Softw* 93:127–145 . doi: 10.1016/j.envsoft.2017.03.001
- Escobar F (2018) The NASZ Model. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 461–464
- Evans TP, Kelley H (2004) Multi-scale analysis of a household level agent-based model of landcover change. *J Environ Manage* 72:57–72 . doi: 10.1016/j.jenvman.2004.02.008

- Fassnacht KS, Cohen WB, Spies TA (2006) Key issues in making and using satellite-based maps in ecology: A primer. For *Ecol Manage* 222:167–181 . doi: 10.1016/j.foreco.2005.09.026
- Fernández IC, Wu J (2016) Assessing environmental inequalities in the city of Santiago (Chile) with a hierarchical multiscale approach. *Appl Geogr* 74:160–169 . doi: 10.1016/j.apgeog.2016.07.012
- Fisher PF (2005) Models of uncertainty in spatial data. In: Longley PA, Goodchild MF, Maguire DJ, Rhind DW (eds) *Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications*. Wiley, pp 191–205
- Gallardo M (2014) *Cambios de usos del suelo y simulación de escenarios en la Comunidad de Madrid*. Universidad Complutense de Madrid
- García-Álvarez D (2018) The influence of scale in LULC modelling. A comparison between two different LULC maps (SIOSE and CORINE). In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 187–213
- García-Llamas P, Calvo L, Álvarez-Martínez JM, Suárez-Seoane S (2016) Using remote sensing products to classify landscape. A multi-spatial resolution approach. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 50:95–105 . doi: 10.1016/j.jag.2016.03.010
- Gibson CC, Ostrom E, Ahn TK (2000) The concept of scale and the human dimensions of global change: A survey. *Ecol Econ* 32:217–239 . doi: 10.1016/S0921-8009(99)00092-0
- Gómez Delgado M, Bosque Sendra J (2004) Aplicación de análisis de incertidumbre como método de validación y control del riesgo en la toma de decisiones. *GeoFocus* 4:179–208
- Goodchild MF (2011) Scale in GIS: An overview. *Geomorphology* 130:5–9 . doi: 10.1016/j.geomorph.2010.10.004
- Gounaridis D, Koukoulas S (2016) Urban land cover thematic disaggregation, employing datasets from multiple sources and RandomForests modeling. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 51:1–10 . doi: 10.1016/j.jag.2016.04.002
- Grinblat Y, Gilichinsky M, Benenson I (2016) Cellular Automata Modeling of Land-Use/Land-Cover Dynamics: Questioning the Reliability of Data Sources and Classification Methods. *Ann Am Assoc Geogr* 106:1299–1320 . doi: 10.1080/24694452.2016.1213154
- Hagen A (2003) Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. *Int J Geogr Inf Sci* 17:235–249 . doi: 10.1080/13658810210157822
- Hasbani, G. J, Wijesekara N, Marceau DJ (2011) An Interactive Method to Dynamically Create Transition Rules in a Land-use Cellular Automata Model. In: Salcido A (ed) *Cellular Automata - Simplicity Behind Complexity*. InTech, pp 3–22
- Hengl T (2006) Finding the right pixel size. *Comput Geosci* 32:1283–1298 . doi: 10.1016/j.cageo.2005.11.008
- Herold M, Couclelis H, Clarke KC (2005) The role of spatial metrics in the analysis and modeling of urban land use change. *Comput Environ Urban Syst* 29:369–399 . doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2003.12.001
- Heuvelink GBM (1998) Uncertainty analysis in environmental modelling under a change of spatial scale. *Nutr Cycl Agroecosystems* 50:255–264 . doi: 10.1023/A:1009700614041
- Hewitt R, Díaz-Pacheco J (2017) Stable models for metastable systems? Lessons from sensitivity analysis of a Cellular Automata urban land use model. *Comput Environ Urban Syst* 62:113–124 . doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2016.10.011
- Houet T, Vacqu   L, Sheeren D (2015) Evaluating the spatial uncertainty of future land abandonment in a mountain valley (Vicdessos, Pyrenees - France): Insights from model parameterization and experiments. *J Mt Sci* 12:1095–1112 . doi: 10.1007/s11629-014-3404-7
- Houet T, Verburg PH, Loveland TR (2010) Monitoring and modelling landscape dynamics. *Landsc Ecol* 25:163–167 . doi: 10.1007/s10980-009-9417-x
- Jantz CA, Goetz SJ (2005) Analysis of scale dependencies in an urban land use change model. *Int J Geogr Inf Sci* 19:217–241 . doi: 10.1080/13658810410001713425
- Jenerette GD, Wu J (1997) On the Definitions of Scale. *Bull Ecol Soc Am* 81:104–105 . doi: 10.2307/20168403

- João E (2001) Measuring scale effects caused by map generalization and the importance of displacement. In: Tate NJ, Atkinson PM (eds) *Modelling Scale in Geographical Information Science*. Wiley, Chichester, New York, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto, pp 161–179
- Johnston MR, Scott CD, Gibb RG (1999) Problems Arising From A Simple GIS Generalisation Algorithm. In: Whigham PA (ed) *SIRC '99: Our Safe Living Environment/ the Changing Face of Spatial Systems/ Proceedings of the 11th Annual Colloquium of the Spatial Information Research Centre*. University of Otago, Spatial Information Research Centre, Dunedin, New Zealand
- Ju J, Gopal S, Kolaczyk ED (2005) On the choice of spatial and categorical scale in remote sensing land cover classification. *Remote Sens Environ* 96:62–77 . doi: 10.1016/j.rse.2005.01.016
- Kazemzadeh-Zow A, Zanganeh Shahraki S, Salvati L, Samani NN (2016) A spatial zoning approach to calibrate and validate urban growth models. *Int J Geogr Inf Sci* 0:1–20 . doi: 10.1080/13658816.2016.1236927
- Kelly RA. B, Jakeman AJ., Barreteau O., et al (2013) Selecting among five common modelling approaches for integrated environmental assessment and management. *Environ Model Softw* 47:159–181 . doi: 10.1016/j.envsoft.2013.05.005
- Kim JH (2013) Spatiotemporal scale dependency and other sensitivities in dynamic land-use change simulations. *Int J Geogr Inf Sci* 27:1782–1803 . doi: 10.1080/13658816.2013.787145
- Kocabas V, Dragicevic S (2006) Assessing cellular automata model behaviour using a sensitivity analysis approach. *Comput Environ Urban Syst* 30:921–953 . doi: 10.1016/j.compenvurbysys.2006.01.001
- Kok K, Veldkamp A (2001) Evaluating impact of spatial scales on land use pattern analysis in Central America. *Agric Ecosyst Environ* 85:205–221 . doi: 10.1016/S0167-8809(01)00185-2
- Lam NS-N, Quattrochi D (1992) On the Issues of Scale, Resolution, and Fractal Analysis in the Mapping Sciences. *Prof Geogr* 44:88–98 . doi: 10.1111/j.0033-0124.1992.00088.x
- Leao SZ (2016) Assessing the trade-off between data quality and spatial resolution for the Thornthwaite Moisture Index mapping. *J Spat Sci* 8596:1–18 . doi: 10.1080/14498596.2016.1220871
- Lesschen JP, Verburg PH, Staal SJ (2005) Statistical methods for analysing the spatial dimension of changes in land use and farming systems. ILRI, LUCC Focus 3 Office, Nairobi, Wageningen
- Li H, Wu J (2006) Uncertainty analysis in ecological studies: an overview. In: Wu J, Jones KB, Li H, Loucks OL (eds) *Scaling and Uncertainty Analysis in Ecology: Methods and Applications*. Springer, Dordrecht, pp 45–66
- Liao J, Tang L, Shao G, et al (2016) Incorporation of extended neighborhood mechanisms and its impact on urban land-use cellular automata simulations. *Environ Model Softw* 75:163–175 . doi: 10.1016/j.envsoft.2015.10.014
- Lloyd CD (2014) *Exploring Spatial Scale in Geography*. Wiley, Chichester
- Lloyd CD (2010) *Spatial Data Analysis: An Introduction for GIS Users*. Oxford University Press, Oxford, New York
- Longley PA, Goodchild MF, Maguire DJ, Rhind DW (2011) *Geographical Information Systems and Science*, 2 edition. Wiley, Chichester
- Mandelbrot B (1967) How Long Is the Coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension. *Science* (80-) 156:636–638 . doi: 10.1126/science.156.3775.636
- Marceau DJ (1999) The scale issue in social and natural sciences. *Can J Remote Sens* 25:347–356 . doi: 10.1080/07038992.1999.10874734
- Mas J-F, Paegelow M, Camacho Olmedo MT (2018) LUCC modeling approaches to calibration. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 1–15
- Meentemeyer V (1989) Geographical perspectives of space, time, and scale. *Landsc Ecol* 3:163–173 . doi: 10.1007/BF00131535
- Ménard A, Marceau DJ (2005) Exploration of spatial scale sensitivity in geographic cellular automata. *Environ Plan B Plan Des* 32:693–714 . doi: 10.1068/b31163

- Milad M, Ming Y, Firuz M, Hanan Z (2016) The simulation and prediction of spatio-temporal urban growth trends using cellular automata models: A review. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 52:380–389 . doi: 10.1016/j.jag.2016.07.007
- Moellering H, Tobler W (1972) Geographical Variances. *Geogr Anal* 4:34–50 . doi: 10.1111/j.1538-4632.1972.tb00455.x
- Morais Viana C (2014) A influência do efeito de escala nos modelos de simulação baseados em autómatos celulares. Universidade de Lisboa
- Moreira E, Costa S, Aguiar AP, et al (2009) Dynamical coupling of multiscale land change models. *Landsc Ecol* 24:1183–1194 . doi: 10.1007/s10980-009-9397-x
- Munroe DK, Müller D (2007) Issues in spatially explicit statistical land-use/cover change (LUCC) models: Examples from western Honduras and the Central Highlands of Vietnam. *Land use policy* 24:521–530 . doi: 10.1016/j.landusepol.2005.09.007
- National Research Council (2014) *Advancing Land Change Modeling: Opportunities and Research Requirements*. National Academies Press, Washington, D.C.
- Nienkemper P, Menz G (2016) Thematic resolution in conservation monitoring - Assessment of the impact of classification detail on landscape analysis using the example of a biosphere reserve. *Erdkunde* 70:237–253 . doi: 10.3112/erdkunde.2016.03.03
- O'Sullivan D, Perry GLW (2013) *Spatial Simulation: Exploring Pattern and Process*. Wiley, Chichester
- Openshaw S, Taylor PJ (1979) A million or so correlation coefficients: three experiments on the modifiable areal unit problem. In: Wrigley N (ed) *Statistical applications in the spatial sciences*. Pion, London, pp 127–144
- Ortega Valcárcel J (2000) *Los horizontes de la Geografía. Teoría de la Geografía*. Ariel, Barcelona
- Paegelow M (2018) Impact and Integration of Multiple Training Dates for Markov Based Land Change Modeling. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 121–138
- Paegelow M, Camacho Olmedo MT, Mas J-F (2018) Techniques for the validation of LUCC modeling outputs. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 53–80
- Pan Y, Roth A, Yu Z, Doluschitz R (2010) The impact of variation in scale on the behavior of a cellular automata used for land use change modeling. *Comput Environ Urban Syst* 34:400–408 . doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2010.03.003
- Pascual-Hortal L, Saura S (2007) Impact of spatial scale on the identification of critical habitat patches for the maintenance of landscape connectivity. *Landsc Urban Plan* 83:176–186 . doi: 10.1016/j.landurbplan.2007.04.003
- Pérez-Hoyos A, García-Haro FJ (2013) Evaluación de productos de cubiertas del suelo en la península ibérica. *Rev Teledetección* 40:22–40
- Pérez-Hoyos A, García-Haro FJ (2009) Análisis Comparativo de las Principales Cartografías de Coberturas del Suelo en la Península Ibérica. In: Montesinos Aranda S, Fernández Fornos L (eds) *Teledetección: Agua y desarrollo sostenible. XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección*. Geosys, Calatayud, pp 209–212
- Pérez-Hoyos A, García-Haro FJ, San-Miguel-Ayanz J (2012) Conventional and fuzzy comparisons of large scale land cover products: Application to CORINE, GLC2000, MODIS and GlobCover in Europe. *ISPRS J Photogramm Remote Sens* 74:185–201 . doi: 10.1016/j.isprsjprs.2012.09.006
- Pontius Jr. RG, Cheuk ML (2006) A generalized cross tabulation matrix to compare soft classified maps at multiple resolutions. *Int J Geogr Inf Sci* 20:1–30 . doi: 10.1080/13658810500391024
- Pontius Jr. RG, Malizia NR (2004) Effect of Category Aggregation on Map Comparison. In: Egenhofer MJ, Freksa C, Miller HJ (eds) *Geographic Information Science. Third International Conference, GIScience*. Springer, Adelphi, pp 251–268
- Pontius Jr. RG, Peethambaram S, Castella J-C (2011) Comparison of Three Maps at Multiple Resolutions: A Case Study of Land Change Simulation in Cho Don District, Vietnam. *Ann Assoc Am Geogr* 101:45–62 . doi: 10.1080/00045608.2010.517742

- Pontius Jr RG (2002) Statistical methods to partition effects of quantity and location during comparison of categorical maps at multiple resolutions. *Photogramm Eng Remote Sensing* 68:1041–1050
- Prestele R, Alexander P, Rounsevell MDA, et al (2016) Hotspots of uncertainty in land-use and land-cover change projections: a global-scale model comparison. *Glob Chang Biol* 22:3967–3983 . doi: 10.1111/gcb.13337
- Quattrochi DA, Goodchild MF (1997) *Scale in remote sensing and GIS*. CRC Press, Boca Raton
- Reed MS, Challies E, de Vente J, et al (2017) A theory of participation: what makes stakeholder and public engagement in environmental management work? *Restor Ecol* 1–19 . doi: 10.1111/j.1399-0012.2012.01641.x
- RIKS (2005) *Metronamica: A Dynamic Spatial Land use Model*. Maastricht
- RIKS (2012) *Metronamica Documentation*. Maastricht
- Robinson WS (1950) Ecological correlations and the behavior of individuals. *Am Sociol Rev* 15:351–357
- Rosa IMD, Purves D, Carreiras JMB, Ewers RM (2015) Modelling land cover change in the Brazilian Amazon: temporal changes in drivers and calibration issues. *Reg Environ Chang* 15:123–137 . doi: 10.1007/s10113-014-0614-z
- Ruíz Rivera N, Galicia Sarmiento L (2016) La escala geográfica como concepto integrador en la comprensión de problemas socio-ambientales. *Investig Geográficas* 89:137 . doi: 10.14350/rig.47515
- Samat N (2006) Characterizing the scale sensitivity of the cellular automata simulated urban growth: A case study of the Seberang Perai Region, Penang State, Malaysia. *Comput Environ Urban Syst* 30:905–920 . doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2005.11.002
- Saura S (2004) Effects of remote sensor spatial resolution and data aggregation on selected fragmentation indices. *Landsc Ecol* 19:197–209 . doi: 10.1023/B:LAND.0000021724.60785.65
- Sayre NF (2005) Ecological and geographical scale: Parallels and potential for integration. *Prog Hum Geogr* 29:276–290 . doi: 10.1191/0309132505ph546oa
- Schmit C, Rounsevell MDA, La Jeunesse I (2006) The limitations of spatial land use data in environmental analysis. *Environ Sci Policy* 9:174–188 . doi: 10.1016/j.envsci.2005.11.006
- Shchiptsova A, Hewitt R, Elena R (2016) Exploratory Spatial Analysis of Regional Urbanization Patterns in the Province of Seville, Spain. Laxenburg, Austria
- Šimová P, Gdulová K (2012) Landscape indices behavior: A review of scale effects. *Appl Geogr* 34:385–394 . doi: 10.1016/j.apgeog.2012.01.003
- Sohl TL, Claggett PR (2013) Clarity versus complexity: Land-use modeling as a practical tool for decision-makers. *J Environ Manage* 129:235–243 . doi: 10.1016/j.jenvman.2013.07.027
- Sohl TL, Loveland TR, Sleeter BM, et al (2010) Addressing foundational elements of regional land-use change forecasting. *Landsc Ecol* 25:233–247 . doi: 10.1007/s10980-009-9391-3
- Syphard AD, Clarke KC, Franklin J, et al (2011) Forecasts of habitat loss and fragmentation due to urban growth are sensitive to source of input data. *J Environ Manage* 92:1882–1893 . doi: 10.1016/j.jenvman.2011.03.014
- Tate N, Atkinson PM (2001) *Modelling scale in geographical information science*. Wiley, Chichester
- Thill J (2011) Is Spatial Really That Special? A Tale of Spaces. In: Popovich V V., Claramunt C, Devogele T, et al. (eds) *Information Fusion and Geographic Information Systems. Towards the Digital Ocean*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp 3–12
- Tobler WR (1970) A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region. *Econ Geogr* 46:234 . doi: 10.2307/143141
- Toro Balbotín D (2014) Analyse de la détérioration de la forêt de la cordillère de la Costa dans le sud chilien: géomatique et modélisation prospective appliquée sur une forêt patrimoniale de la province d'Osorno (41° 15' - 41° 00' latitude Sud). Université Toulouse 2 Le Mirail. Laboratoire GEODE
- Van Delden H, Seppelt R, White R, Jakeman AJ (2011a) A methodology for the design and development of integrated models for policy support. *Environ Model Softw* 26:266–279 . doi: 10.1016/j.envsoft.2010.03.021

- Van Delden H, Van Vliet J, Rutledge DT, Kirkby MJ (2011b) Comparison of scale and scaling issues in integrated land-use models for policy support. *Agric Ecosyst Environ* 142:18–28 . doi: 10.1016/j.agee.2011.03.005
- Van Schrojenstein Lantman J, Verburg PH, Bregt A, Geertman S (2011) Core Principles and Concepts in Land-Use Modelling: A Literature Review. In: Koomen E, Borsboom-Van Beurden J (eds) *Land-Use Modelling in Planning Practice*. Springer, Dordrecht, Heidelberg, London, New York, pp 35–57
- Van Vliet J, Bregt AK, Brown DG, et al (2016) A review of current calibration and validation practices in land-change modeling. *Environ Model Softw* 82:174–182 . doi: 10.1016/j.envsoft.2016.04.017
- Van Vliet J, Hagen-Zanker A, Hurkens J, Van Delden H (2013a) A fuzzy set approach to assess the predictive accuracy of land use simulations. *Ecol Modell* 261–262:32–42 . doi: 10.1016/j.ecolmodel.2013.03.019
- Van Vliet J, Naus N, Van Lammeren RJA, et al (2013b) Measuring the neighbourhood effect to calibrate land use models. *Comput Environ Urban Syst* 41:55–64 . doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2013.03.006
- Van Vliet J, White R, Dragicevic S, et al (2009) Modeling urban growth using a variable grid cellular automaton. *Comput Environ Urban Syst* 33:35–43 . doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2008.06.006
- Veldkamp A, Fresco LO (1997) Reconstructing land use drivers and their spatial scale dependence for Costa Rica (1973 and 1984). *Agric Syst* 55:19–43 . doi: 10.1016/S0308-521X(95)00080-O
- Veldkamp A, Verburg PH, Kok K, et al (2001) The need for scale sensitive approached in spatially explicit land use change modeling. *Environ Model Assess* 6:111–121 . doi: <https://doi.org/10.1023/A:1011572301150>
- Verburg PH, Chen YQ (2000) Multiscale characterization of land-use patterns in China. *Ecosystems* 3:369–385 . doi: 10.1007/s100210000033
- Verburg PH, de Groot WT, Veldkamp A (2003) Methodology for Multi-Scale Land-Use Change Modelling: Concepts and Challenges. In: Dolman AJ, Verhagen A, Rovers CA (eds) *Global Environmental Change and Land Use*. Springer, Dordrecht, pp 17–51
- Verburg PH, de Nijs TCM, Van Eck JR, et al (2004a) A method to analyse neighbourhood characteristics of land use patterns. *Comput Environ Urban Syst* 28:667–690 . doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2003.07.001
- Verburg PH, Eickhout B, Van Meijl H (2007) A multi-scale, multi-model approach for analyzing the future dynamics of European land use. *Ann Reg Sci* 42:57–77 . doi: 10.1007/s00168-007-0136-4
- Verburg PH, Neumann K, Nol L (2011) Challenges in using land use and land cover data for global change studies. *Glob Chang Biol* 17:974–989 . doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02307.x
- Verburg PH, Schot P, Dijst M, Veldkamp A (2004b) Land use change modelling: current practice and research priorities. *GeoJournal* 61:309–324 . doi: 10.1007/s10708-004-4946-y
- Verburg PH, Tabeau A, Hatna E (2013) Assessing spatial uncertainties of land allocation using a scenario approach and sensitivity analysis: A study for land use in Europe. *J Environ Manage* 127:S132–S144 . doi: 10.1016/j.jenvman.2012.08.038
- Verburg PH, Van Berkel DB, Van Doorn AM, et al (2010) Trajectories of land use change in Europe: A model-based exploration of rural futures. *Landsc Ecol* 25:217–232 . doi: 10.1007/s10980-009-9347-7
- Verburg PH, Veldkamp A (2004) Projecting land use transitions at forest in the Philippines at two spatial scales. *Landsc Ecol* 19:77–98 . doi: 10.1023/B:LAND.0000018370.57457.58
- Villa G, Valcarcel N, Caballero ME, et al (2008) Land Cover Classifications: An Obsolete Paradigm. In: Chen J, Jiang J, Nayak S (eds) *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. ISPRS, Beijing, pp 609–614
- Wainwright J, Mulligan M (2013) *Environmental Modelling: Finding Simplicity in Complexity*, 2 edition. Wiley, Chichester
- Wang F, Marceau DJ (2013) A patch-based cellular automaton for simulating land-use changes at fine spatial resolution. *Trans GIS* 17:828–846 . doi: 10.1111/tgis.12009
- Waser LT, Schwarz M (2006) Comparison of large-area land cover products with national forest inventories and CORINE land cover in the European Alps. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 8:196–207 . doi: 10.1016/j.jag.2005.10.001
- Watson MK (1978) The Scale Problem in Human Geography. *Geogr Ann Ser B* 60:36–47 . doi: 10.2307/490730

- White R (1977) Dynamic Central Place Theory: Results of a Simulation Approach. *Geogr Anal* 9:226–243 . doi: 10.1111/j.1538-4632.1977.tb00576.x
- White R (1978) The Simulation of Central Place Dynamics: Two Sector Systems and the Rank-Size Distribution. *Geogr Anal* 10:201–208 . doi: 10.1111/j.1538-4632.1978.tb00011.x
- White R, Engelen G (1997) Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling. *Environ Plan B Plan Des* 24:235–246 . doi: <https://doi.org/10.1068/b240235>
- White R, Engelen G (2000) High-resolution integrated modelling of the spatial dynamics of urban and regional systems. *Comput Environ Urban Syst* 24:383–400 . doi: [https://doi.org/10.1016/S0198-9715\(00\)00012-0](https://doi.org/10.1016/S0198-9715(00)00012-0)
- Wong D (2009) The Modifiable Areal Unit Problem (MAUP). In: Stewart Fotheringham A, Rogerson PA (eds) *The SAGE Handbook of Spatial Analysis*. SAGE, Los Angeles, London, New Delhi, Singapore, pp 104–124
- Woodcock CE, Strahler AH (1987) The factor of scale in remote sensing. *Remote Sens Environ* 21:311–332 . doi: 10.1016/0034-4257(87)90015-0
- Wu H, Li ZL (2009) Scale issues in remote sensing: A review on analysis, processing and modeling. *Sensors* 9:1768–1793 . doi: 10.3390/s90301768
- Wu J (2007) Scale and scaling: a cross-disciplinary perspective. In: Wu J, Hobbs RJ (eds) *Key Topics in Landscape Ecology*. Cambridge University Press, Cambridge, New York, pp 115–142
- Wu J (2004) Effects of changing scale on landscape pattern analysis: Scaling relations. *Landsc Ecol* 19:125–138 . doi: 10.1023/B:LAND.0000021711.40074.ac
- Wu J, Harbin L (2006a) Concepts of Scale and Scaling. In: Wu J, Jones KB, Li H, Loucks OL (eds) *Scaling and Uncertainty Analysis in Ecology: Methods and Applications*. Springer, Dordrecht, The Netherlands, pp 3–15
- Wu J, Harbin L (2006b) Perspectives and methods of scaling. In: Wu J, Jones KB, Li H, Loucks OL (eds) *Scaling and Uncertainty Analysis in Ecology: Methods and Applications*. Springer, Dordrecht, The Netherlands, pp 17–44
- Yeh AG-O, Li X (2006) Errors and uncertainties in urban cellular automata. *Comput Environ Urban Syst* 30:10–28 . doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2004.05.007
- Zhao G (2013) Effects of Spatial Scale in Cellular Automata Model for Land Use Change. In: Gaol FL (ed) *Recent Progress in Data Engineering and Internet Technology*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp 101–106
- Zhao G (2011) The effect of land use categories resolution on geography cellular automata model. In: 2011 International Conference on Multimedia Technology, ICMT. IEEE, Hangzhou, China, pp 5614–5617

Chapter 7

- Aschbacher J, Milagro-Pérez MP (2012) The European Earth monitoring (GMES) programme: Status and perspectives. *Remote Sens Environ* 120:3–8 . doi: 10.1016/j.rse.2011.08.028
- Aune-Lundberg L, Strand G-H (2010a) CORINE Land Cover 2006 - The Norwegian CLC2006 project
- Aune-Lundberg L, Strand G-H (2010b) Corine Land Cover Classes. Examination of the content of CLC classes in Norway
- Bontemps S, Defourny P, Van Bogaert E, et al (2011) *GLOBCOVER 2009 Products Description and Validation Report*
- Burriel Moreno JÁ, Ibáñez i Martí JJ, Masó Pau J (2008) SIOSE En Cataluña: obtención a partir del mapa de cubiertas del suelo de Cataluña. In: Hernández-Calvento L, María Parreño J (eds) *Tecnologías de la Información Geográfica para el desarrollo territorial: XIII Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica*. Servicio de Publicaciones y Difusión Científica de la ULPGC, Las Palmas de Gran Canaria, pp 876–889

- Büttner G, Maucha G, Kosztra B (2016) High-Resolution Layers. In: Feranec J, Soukup T, Hazeu G, Jaffrain G (eds) *European Landscape Dynamics. CORINE Land Cover Data*. CRC Press, Boca Raton, pp 61–69
- Cai S, Liu D, Sulla-Menashe D, Friedl MA (2014) Enhancing MODIS land cover product with a spatial-temporal modeling algorithm. *Remote Sens Environ* 147:243–255 . doi: 10.1016/j.rse.2014.03.012
- Castilla G, Hay GJ (2007) Uncertainties in land use data. *Hydrol Earth Syst Sci* 11:1857–1868 . doi: 10.5194/hess-11-1857-2007
- Catalá Mateo R, Bosque Sendra J, Plata Rochas W (2008) Análisis de posibles errores en la base de datos Corine Land Cover (1990-2000) en la Comunidad de Madrid. *Estud geogràfics* 69:81–104
- Delgado Hernández J (2016) Methodology of classification extraction from descriptive systems of land cover and land use
- Delgado Hernández J, Valcárcel Sanz N, Arozarena Villar A, et al (2017) Sistema de información sobre Ocupación del Suelo en España (SIOSE) de Alta Resolución, metodología de integración automática. In: Ruiz LA, Estornell J, Erena M (eds) *Nuevas plataformas y sensores de teledetección. XVII Congreso de la Asociación Española de Teledetección*. Murcia, pp 307–310
- Di Gregorio A, Jansen LJ. (1998) *Land Cover Classification System (LCCS): Classification Concepts and User Manual*. FAO, Rome
- Equipo Técnico Nacional SIOSE (2015) Documento Técnico SIOSE 2011. Versión 1.1
- ESA (2017) *Land Cover CCI. Product User Guide. Version 2.0*
- European Environment Agency (1994) *CORINE Land cover*
- Fassnacht KS, Cohen WB, Spies TA (2006) Key issues in making and using satellite-based maps in ecology: A primer. *For Ecol Manage* 222:167–181 . doi: 10.1016/j.foreco.2005.09.026
- Fernández Noguerol S (2017) Desarrollo de herramientas para el tratamiento de la información y el análisis con SIG de los usos del suelo utilizando el SIOSE. Una aproximación al caso de Asturias. *Geofocus* 20:233–251
- Friedl MA, Sulla-Menashe D, Tan B, et al (2010) MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets. *Remote Sens Environ* 114:168–182 . doi: 10.1016/j.rse.2009.08.016
- Gallaun H (2017) *Urban Atlas 2012 Validation Report*
- Gil Y, Romero D, Ortega E, et al (2010) SIOSE Andalucía, experiencia de integración y actualización de bases cartográficas multiescala. In: Ojeda J, Pita MF, Vallejo I (eds) *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla, Sevilla, pp 116–134
- Giri C, Zhu Z, Reed B (2005) A comparative analysis of the Global Land Cover 2000 and MODIS land cover data sets. *Remote Sens Environ* 94:123–132 . doi: 10.1016/j.rse.2004.09.005
- Hazeu G, Büttner G, Arozarena A, et al (2016) Detailed CLC Data: Member States with CLC Level 4/Level 5 and (Semi-) Automated Solutions. In: Feranec J, Soukup T, Hazeu G, Jaffrain G (eds) *European Landscape Dynamics. CORINE Land Cover Data*. CRC Press, Boca Raton, pp 275–304
- Herold M, Mayaux P, Woodcock CE, et al (2008) Some challenges in global land cover mapping: An assessment of agreement and accuracy in existing 1km datasets. *Remote Sens Environ* 112:2538–2556 . doi: 10.1016/j.rse.2007.11.013
- Hovenbitzer M, Emig F, Wende C, et al (2014) Digital Land Cover Model for Germany – DLM-DE. In: Manakos I, Braun M (eds) *Land Use and Land Cover Mapping in Europe: Practices & Trends*. Springer, Dordrecht, Heidelberg, New York, London, pp 255–272
- Hurbánek P, Atkinson PM, Pazur R, Rosina K (2010) Accuracy of built-up area mapping in Europe at varying scales and thresholds. In: Tate NJ, Fisher PF (eds) *Accuracy 2010. Proceedings of the Ninth International Symposium on Spatial Accuracy. Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences*. Leicester, pp 385–388
- Jaffrain G (2017) *CORINE Land Cover 2012. Final validation report*

- Jaffrain G, Sannier C, Feranec J (2016) Monitoring of Urban Fabric Classes and Their Validation in Selected European Cities (Urban Atlas). In: Feranec J, Soukup T, Hazeu G, Jaffrain G (eds) *European Landscape Dynamics. CORINE Land Cover Data*. CRC Press, Boca Raton, pp 141–156
- Kleeschulte S, Banko G, Smith G, et al (2017) Technical specifications for implementation of a new land-monitoring concept based on EAGLE. D3: Draft design concept and CLC-Backbone, CLC-Core technical specifications, including requirements review. Version 3.0
- Krówczyńska M, Soszyńska A, Pabjanek P, et al (2016) Accuracy of the Soil Sealing Enhancement Product for Poland. *Quaest Geogr* 35:89–95 . doi: 10.1515/quageo-2016-0029
- Kuemmerle T, Erb K, Meyfroidt P, et al (2013) Challenges and opportunities in mapping land use intensity globally. *Curr Opin Environ Sustain* 5:484–493 . doi: 10.1016/j.cosust.2013.06.002
- Langanke T (2015) GIO land (GMES/Copernicus initial operations land) High Resolution Layers (HRLs) – summary of product specifications
- Lydon K, Smith G (2014) *Corine Land Cover 2012 Ireland Final Report*. Wexford
- Manakos I, Braun M (2014) *Land Use and Land Cover Mapping in Europe: Practices & Trends*. Springer, Dordrecht, Heidelberg, New York, London
- Maucha G, Buettner G (2005) Validation of the European CORINE Land Cover 2000 database. In: Universidade Estadual Paulista (ed) *25th EARSeL Symposium on Global Developments in Environmental Earth Observation from Space*. Millpress, Porto, pp 449–457
- Montero E, Van Wolvelaer J, Garzón A (2014) The European urban atlas. In: Manakos I, Braun M (eds) *Land Use and Land Cover Mapping in Europe: Practices & Trends*. Springer, Dordrecht, Heidelberg, New York, London, pp 115–124
- Morillo Fernández C (ed) (2003) *Atlas y Manual de los Hábitats de España*. Ministerio de Medio Ambiente
- Mücher CA (2000) *PELCOM*. Final report
- Pérez-Hoyos A, García-Haro FJ, San-Miguel-Ayanz J (2012) A methodology to generate a synergetic land-cover map by fusion of different: Land-cover products. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 19:72–87 . doi: 10.1016/j.jag.2012.04.011
- Pérez-Hoyos A, Rembold F, Kerdiles H, Gallego J (2017) Comparison of Global Land Cover Datasets for Cropland Monitoring. *Remote Sens* 9:1118 . doi: 10.3390/rs9111118
- Pontius Jr. RG, Lippitt CD (2006) Can Error Explain Map Differences Over Time? *Cartogr Geogr Inf Sci* 33:159–171 . doi: 10.1559/152304006777681706
- Sannier C (2016) *Natura 2000 Validation Report*
- Sannier C (2017) *Riparian Zones Land Cover Land Use Validation Report*
- Sexton JO, Noojipady P, Song X-P, et al (2015) Conservation policy and the measurement of forests. *Nat Clim Chang* 6:1–6 . doi: 10.1038/nclimate2816
- Solbjørg E, Heggem F, Strand G-H (2010) CORINE Land Cover 2000. The Norwegian CLC2000 project
- Tchuenté ATK, Roujean JL, de Jong SM (2011) Comparison and relative quality assessment of the GLC2000, GLOBCOVER, MODIS and ECOCLIMAP land cover data sets at the African continental scale. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 13:207–219 . doi: 10.1016/j.jag.2010.11.005
- Valcárcel N, Villa G, Arozarena A, et al (2008) SIOSE, a successful test bench towards harmonization and integration of land cover/use information as environmental reference data. In: Chen J, Jiang J, Peled A (eds) *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B8. ISPRS, Beijing
- Valcárcel Sanz N, Castaño Fernández S (2012) *Cartografía de ocupación del suelo en España. Proyecto SIOSE*. CNIG, Madrid
- Verburg PH, Neumann K, Nol L (2011) Challenges in using land use and land cover data for global change studies. *Glob Chang Biol* 17:974–989 . doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02307.x
- Yang H, Li S, Chen J, et al (2017a) The Standardization and Harmonization of Land Cover Classification Systems towards Harmonized Datasets: A Review. *ISPRS Int J Geo-Information* 6:154 . doi: 10.3390/ijgi6050154

Yang Z, Dong J, Liu J, et al (2017b) Accuracy Assessment and Inter-Comparison of Eight Medium Resolution Forest Products on the Loess Plateau, China. *ISPRS Int J Geo-Information* 6:152 . doi: 10.3390/ijgi6050152

Chapter 8

- Aune-Lundberg L, Strand G-H (2010) Corine Land Cover Classes. Examination of the content of CLC classes in Norway
- Bach M, Breuer L, Frede HG, et al (2006) Accuracy and congruency of three different digital land-use maps. *Landsc Urban Plan* 78:289–299 . doi: 10.1016/j.landurbplan.2005.09.004
- Brown N, Gerard F, Fuller R (2002) Mapping of land use classes within the CORINE Land Cover Map of Great Britain. *Cartogr J* 39:5–14 . doi: 10.1179/caj.2002.39.1.5
- Büttner G (2014) CORINE Land Cover and Land Cover Change Products. In: Manakos I, Braun M (eds) *Land Use and Land Cover Mapping in Europe: Practices & Trends*. Springer, Dordrecht, Heidelberg, New York, London, pp 55–74
- Caetano M, Mata F, Freire S (2006) Accuracy assessment of the Portuguese CORINE Land Cover map. In: *Global Developments in Environmental Earth Observation from Space. Proceedings of the 25th EARSeL Symposium*. Millpress, Porto, pp 459–627
- Camacho Olmedo MT, Pontius Jr RG, Paegelow M, Mas J-F (2015) Comparison of simulation models in terms of quantity and allocation of land change. *Environ Model Softw* 69:214–221 . doi: 10.1016/j.envsoft.2015.03.003
- Cantarinó Martí I (2013) Elaboración y validación de un modelo jerárquico derivado de SIOSE. *Rev Teledetec* 5–21
- Cao C, Siu-Ngan Lam N (1997) Understanding the Scale and Resolution Effects in Remote Sensing and GIS. In: Quattrochi DA, Goodchild MF (eds) *Scale in Remote Sensing and GIS*. CRC press, Boca Raton, pp 57–72
- Catalá Mateo R, Bosque Sendra J, Plata Rochas W (2008) Análisis de posibles errores en la base de datos Corine Land Cover (1990–2000) en la Comunidad de Madrid. *Estud geográficos* 69:81–104
- Congalton RG (1997) Exploring and Evaluating the Consequences of Vector-to-Raster and Raster-to-Vector Conversion. *Photogramm Eng Remote Sens* 63:425–434
- Cortizo Álvarez T, Fernández García F, Maceda Rubio A (1990) Asturias. In: Bosque Maurel J, Vilá Valentín J (eds) *Geografía de España 4. Galicia, Asturias y Cantabria*. Planeta, Barcelona, pp 289–460
- Cruickshank MM, Tomlinson RW (1996) Application of CORINE Land Cover Methodology to the U.K.- Some Issues Raised from Northern Ireland. *Glob Ecol Biogeogr Lett* 5:235 . doi: 10.2307/2997792
- Delgado Hernández J (2008) Armonización de las bases de datos de ocupación del suelo y su importancia en la evaluación de parámetros e indicadores medioambientales. In: *Congreso Nacional de Medio Ambiente. Cumbre del Desarrollo Sostenible*. Madrid
- Delgado Hernández J (2016) Methodology of classification extraction from descriptive systems of land cover and land use
- Dendoncker N, Schmit C, Rounsevell M (2008) Exploring spatial data uncertainties in land use change scenarios. *Int J Geogr Inf Sci* 22:1013–1030 . doi: 10.1080/13658810701812836
- Díaz-Pacheco J, Gutiérrez J (2013) Exploring the limitations of CORINE Land Cover for monitoring urban land-use dynamics in metropolitan areas. *J Land Use Sci* 1–17 . doi: 10.1080/1747423X.2012.761736
- Díaz-Pacheco J, Van Delden H, Hewitt R (2018) The importance of scale in land use models: experiments in data conversion, data resampling, resolution and neighbourhood extent. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 163–186
- Dirección General de Urbanismo (1964) *Plan General de Ordenación Urbana de la Comarca Central de Asturias*. Ministerio de la Vivienda, Secretaría General Técnica, Madrid
- Equipo Técnico Nacional SIOSE (2015a) Documento Técnico SIOSE 2011. Versión 1.1

- Equipo Técnico Nacional SIOSE (2015b) Metodología de Actualización SIOSE. Versión 2. Instituto Geográfico Nacional
- European Environment Agency (2015) Copernicus Land Service - Pan-European Component: CORINE Land Cover
- Feranec J (1999) Interpretation element “association”: analysis and definition. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 1:64–67 . doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0303-2434\(99\)85029-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0303-2434(99)85029-6)
- Feranec J, Hazeu G, Christensen S, Jaffrain G (2007) Corine land cover change detection in Europe (case studies of the Netherlands and Slovakia). *Land use policy* 24:234–247 . doi: 10.1016/j.landusepol.2006.02.002
- Feranec J, Jaffrain G, Soukup T, Hazeu G (2010) Determining changes and flows in European landscapes 1990-2000 using CORINE land cover data. *Appl Geogr* 30:19–35 . doi: 10.1016/j.apgeog.2009.07.003
- Feranec J, Súrí M, Otáhel J, et al (2000) Inventory of major landscape changes in the Czech Republic, Hungary, Romania and Slovak Republic 1970s – 1990s. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 2:129–139 . doi: 10.1016/S0303-2434(00)85006-0
- Fernández García A (2003) Las pautas del crecimiento urbano posindustrial: de la rururbanización a la ciudad difusa. *Ería* 60:88–92 . doi: <https://doi.org/10.17811/er.0.2003.88-92>
- Fernández García A, Ortega Montequín M, Sevilla Álvarez J, et al (2007) Población, administración y territorio en Asturias. Consejo Económico y Social del Principado de Asturias, Oviedo
- Fritz S, See L (2005) Comparison of land cover maps using fuzzy agreement. *Int J Geogr Inf Sci* 19:787–807 . doi: 10.1080/13658810500072020
- Gallego J, Bamps C (2008) Using CORINE land cover and the point survey LUCAS for area estimation. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 10:467–475 . doi: 10.1016/j.jag.2007.11.001
- García-Álvarez D (2018) The influence of scale in LULC modelling. A comparison between two different LULC maps (SIOSE and CORINE). In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 187–213
- García-Llamas P, Calvo L, Álvarez-Martínez JM, Suárez-Seoane S (2016) Using remote sensing products to classify landscape. A multi-spatial resolution approach. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 50:95–105 . doi: 10.1016/j.jag.2016.03.010
- García Martínez ED, Chas-Amil ML, Touza J (2015) Assessment of the Spanish land cover information to estimate forest area in Galicia. *Boletín la Asoc Geógrafos Españoles* 69:333–350
- Gil Y, Romero D, Ortega E, et al (2010) SIOSE Andalucía, experiencia de integración y actualización de bases cartográficas multiescala. In: Ojeda J, Pita MF, Vallejo I (eds) *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla, Sevilla, pp 116–134
- Gil Olcina A, Gómez Mendoza J (eds) (2001) *Geografía de España*. Ariel, Barcelona
- Giri C, Zhu Z, Reed B (2005) A comparative analysis of the Global Land Cover 2000 and MODIS land cover data sets. *Remote Sens Environ* 94:123–132 . doi: 10.1016/j.rse.2004.09.005
- Gobierno del Principado de Asturias (2006) Avance de la Revisión de las Directrices Regionales de Ordenación del Territorio
- Gobierno del Principado de Asturias (1991) Directrices Regionales de Ordenación del Territorio
- Goerlich FJ, Cantarino I (2013) A population density grid for Spain. *Int J Geogr Inf Sci* 27:2247–2263 . doi: 10.1080/13658816.2013.799283
- Hansen MC, Reed B (2000) A comparison of the IGBP DISCover and University of Maryland 1 km global land cover products. *Int J Remote Sens* 21:1365–1373 . doi: 10.1080/014311600210218
- Härmä P, Teiniranta R, Törmä M, et al (2004) The Production of Finnish Corine Land Cover 2000 Classification. In: Altan O (ed) *XXth ISPRS Congress*. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Estambul, pp 1330–1335
- Hazeu G, Büttner G, Arozarena A, et al (2016) Detailed CLC Data: Member States with CLC Level 4/Level 5 and (Semi-) Automated Solutions. In: Feranec J, Soukup T, Hazeu G, Jaffrain G (eds) *European Landscape Dynamics. CORINE Land Cover Data*. CRC Press, Boca Raton, pp 275–304
- Hengl T (2006) Finding the right pixel size. *Comput Geosci* 32:1283–1298 . doi: 10.1016/j.cageo.2005.11.008

- Herold M, Mayaux P, Woodcock CE, et al (2008) Some challenges in global land cover mapping: An assessment of agreement and accuracy in existing 1km datasets. *Remote Sens Environ* 112:2538–2556 . doi: 10.1016/j.rse.2007.11.013
- Hewitt R, Escobar F (2011) The territorial dynamics of fast-growing regions: Unsustainable land use change and future policy challenges in Madrid, Spain. *Appl Geogr* 31:650–667 . doi: 10.1016/j.apgeog.2010.11.002
- Hewitt R, Van Delden H, Escobar F (2014) Participatory land use modelling, pathways to an integrated approach. *Environ Model Softw* 52:149–165 . doi: 10.1016/j.envsoft.2013.10.019
- Hovenbitzer M, Emig F, Wende C, et al (2014) Digital Land Cover Model for Germany – DLM-DE. In: Manakos I, Braun M (eds) *Land Use and Land Cover Mapping in Europe: Practices & Trends*. Springer, Dordrecht, Heidelberg, New York, London, pp 255–272
- Lydon K, Smith G (2014) *Corine Land Cover 2012 Ireland Final Report*. Wexford
- Mas J-F, Kolb M, Houet T, et al (2011) Éclairer le choix des outils de simulation des changements des modes d'occupation et d'usages des sols. Une approche comparative. *Rev Int Géomatique* 21:405–430 . doi: 10.3166/RIG.15.297-322
- McCallum I, Obersteiner M, Nilsson S, Shvidenko A (2006) A spatial comparison of four satellite derived 1 km global land cover datasets. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 8:246–255 . doi: 10.1016/j.jag.2005.12.002
- McGarigal K, Cushman SA, Neel MC, Ene E (2015) *FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical and Continuous Maps*
- Neumann K, Herold M, Hartley A, Schmillius C (2007) Comparative assessment of CORINE2000 and GLC2000: Spatial analysis of land cover data for Europe. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 9:425–437 . doi: 10.1016/j.jag.2007.02.004
- Ozdogan M, Woodcock CE (2006) Resolution dependent errors in remote sensing of cultivated areas. *Remote Sens Environ* 103:203–217 . doi: 10.1016/j.rse.2006.04.004
- Pérez-Hoyos A, García-Haro FJ (2009) Análisis Comparativo de las Principales Cartografías de Coberturas del Suelo en la Península Ibérica. In: Montesinos Aranda S, Fernández Fornos L (eds) *Teledetección: Agua y desarrollo sostenible. XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección*. Geosys, Calatayud, pp 209–212
- Pérez-Hoyos A, García-Haro FJ, San-Miguel-Ayanz J (2012) Conventional and fuzzy comparisons of large scale land cover products: Application to CORINE, GLC2000, MODIS and GlobCover in Europe. *ISPRS J Photogramm Remote Sens* 74:185–201 . doi: 10.1016/j.isprsjprs.2012.09.006
- Perez-Hoyos A, Garcia-Haro FJ, Valcárcel N (2014) Incorporating sub-dominant classes in the accuracy assessment of large-area land cover products: Application to GlobCover, MODISLC, GLC2000 and CORINE in Spain. *IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens* 7:187–205 . doi: 10.1109/JSTARS.2013.2258659
- Pontius Jr. RG, Millones M (2011) Death to Kappa: birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. *Int J Remote Sens* 32:4407–4429 . doi: 10.1080/01431161.2011.552923
- Pontius Jr. RG, Santacruz A (2014) Quantity, exchange, and shift components of difference in a square contingency table. *Int J Remote Sens* 35:7543–7554 . doi: 10.1080/2150704X.2014.969814
- Quirós Linares F, Ortega Valcárcel J (1987) Asturias y Cantabria. In: de Terán M, Solé Sabarís L, Vilá Valentí J (eds) *Geografía Regional de España*. Ariel, Barcelona, p 543
- Ran Y, Li X, Lu L (2010) Evaluation of four remote sensing based land cover products over China. *Int J Remote Sens* 31:391–401 . doi: 10.1080/01431160902893451
- Rindfuss RR, Walsh SJ, Turner BL, et al (2004) Developing a science of land change: challenges and methodological issues. *Proc Natl Acad Sci U S A* 101:13976–13981 . doi: 10.1073/pnas.0401545101
- Rodríguez Gozalo J (2012) *Evolución potencial de los usos del suelo en Asturias a través del análisis de variables territoriales*. Universidad de Oviedo
- Smith G, Beare M, Boyd M, et al (2007) UK Land Cover Map Production Through the Generalisation of OS MasterMap ®. *Cartogr J* 44:276–283 . doi: 10.1179/000870407X241827

- Soares-Filho BS, Cerqueira GC, Pennachin CL, et al (2002) DINAMICA - a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *Ecol Modell* 154:217–235 . doi: 10.1016/S0304-3800(02)00059-5
- Solbjørg E, Heggem F, Strand G-H (2010) CORINE Land Cover 2000. The Norwegian CLC2000 project
- Strand GH, Dramstad W, Engan G (2002) The effect of field experience on the accuracy of identifying land cover types in aerial photographs. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 4:137–146 . doi: 10.1016/S0303-2434(02)00011-9
- Tchuenté ATK, Roujean JL, de Jong SM (2011) Comparison and relative quality assessment of the GLC2000, GLOBCOVER, MODIS and ECOCLIMAP land cover data sets at the African continental scale. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 13:207–219 . doi: 10.1016/j.jag.2010.11.005
- Teixeira Z, Marques JC, Pontius Jr. RG (2016) Evidence for deviations from uniform changes in a Portuguese watershed illustrated by CORINE maps: An Intensity Analysis approach. *Ecol Indic* 66:382–390 . doi: 10.1016/j.ecolind.2016.01.018
- Valcárcel Sanz N, Castaño Fernández S (2012) Cartografía de ocupación del suelo en España. Proyecto SI- OSE. CNIG, Madrid
- Verburg PH, Neumann K, Nol L (2011) Challenges in using land use and land cover data for global change studies. *Glob Chang Biol* 17:974–989 . doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02307.x
- Waser LT, Schwarz M (2006) Comparison of large-area land cover products with national forest inventories and CORINE land cover in the European Alps. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 8:196–207 . doi: 10.1016/j.jag.2005.10.001

Chapter 9

- Agarwal C, Green GM, Grove JM, et al (2002) A review and assessment of land-use change models: dynamics of space, time, and human choice. Newtown
- Ahmed S, Bramley G (2015) How will Dhaka grow spatially in future?-Modelling its urban growth with a near-future planning scenario perspective. *Int J Sustain Built Environ* 4:359–377 . doi: 10.1016/j.ijbs.2015.07.003
- Alonso Ibáñez MR, Pérez Fernández JM (2012) Espacio metropolitano y difusión urbana: su incidencia en el medio rural. Consejo Económico y Social del Principado de Asturias, Oviedo
- Antrop M (2004) Landscape change and the urbanization process in Europe. *Landsc Urban Plan* 67:9–26 . doi: 10.1016/S0169-2046(03)00026-4
- Bhatti SS, Tripathi NK, Nitivattananon V, et al (2015) A multi-scale modeling approach for simulating urbanization in a metropolitan region. *Habitat Int* 50:354–365 . doi: 10.1016/j.habitatint.2015.09.005
- Blanchard SD, Pontius Jr. RG, Urban KM (2015) Implications of Using 2 m versus 30 m Spatial Resolution Data for Suburban Residential Land Change Modeling. *J Environ Informatics* 25:1–13 . doi: 10.3808/jei.201400284
- Botequilha Leitao A, Miller J, Ahern J, McGarigal K (2006) *Measuring Landscapes: A Planner's Handbook*. Island Press, Washington, Covelo, London
- Burrough PA, McDonnell RA, Lloyd CD (2015) *Principles of Geographical Information Systems*, 3 edition. Oxford University Press, Oxford
- Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F (2013) Interest in intermediate soft-classified maps in land change model validation: suitability versus transition potential. *Int J Geogr Inf Sci* 27:2343–2361 . doi: 10.1080/13658816.2013.831867
- Cao C, Siu-Ngan Lam N (1997) Understanding the Scale and Resolution Effects in Remote Sensing and GIS. In: Quattrochi DA, Goodchild MF (eds) *Scale in Remote Sensing and GIS*. CRC press, Boca Raton, pp 57–72
- Carrero de Roa M (2012) Transformaciones de los espacios rururbanos en el Área Metropolitana de Asturias. In: Alonso Ibáñez MR, Pérez Fernández JM (eds) *Espacio metropolitano y difusión urbana: su incidencia en el medio rural*. Consejo Económico y Social del Principado de Asturias, Oviedo, pp 135–154

- Castilla G, Larkin K, Linke J, Hay GJ (2009) The impact of thematic resolution on the patch-mosaic model of natural landscapes. *Landsc Ecol* 24:15–23 . doi: 10.1007/s10980-008-9310-z
- Clarke KC (2004) The limits of simplicity: toward geocomputational honesty in urban modeling. In: Atkinson P, Foody G, Darby S, Wu F (eds) *Geodynamics*. CRC Press, Boca Raton, pp 215–232
- Conway TM (2009) The impact of class resolution in land use change models. *Comput Environ Urban Syst* 33:269–277 . doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2009.02.001
- Delgado Hernández J (2016) Methodology of classification extraction from descriptive systems of land cover and land use
- Dendoncker N, Schmit C, Rounsevell M (2008) Exploring spatial data uncertainties in land use change scenarios. *Int J Geogr Inf Sci* 22:1013–1030 . doi: 10.1080/13658810701812836
- Dietzel C, Clarke KC (2006) The effect of disaggregating land use categories in cellular automata during model calibration and forecasting. *Comput Environ Urban Syst* 30:78–101 . doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2005.04.001
- Fernández García A, Ortega Montequín M, Sevilla Álvarez J, et al (2007) Población, administración y territorio en Asturias. Consejo Económico y Social del Principado de Asturias, Oviedo
- Follador M, Villa N, Paegelow M (2008) Tropical deforestation modelling: comparative analysis of different predictive approaches. The case study of Peten, Guatemala. In: Paegelow M, Camacho Olmedo MT (eds) *Modelling Environmental Dynamics*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp 77–107
- García Martínez ED, Chas-Amil ML, Touza J (2015) Assessment of the Spanish land cover information to estimate forest area in Galicia. *Boletín la Asoc Geógrafos Españoles* 69:333–350
- Hengl T (2006) Finding the right pixel size. *Comput Geosci* 32:1283–1298 . doi: 10.1016/j.cageo.2005.11.008
- Herold M, Couclelis H, Clarke KC (2005) The role of spatial metrics in the analysis and modeling of urban land use change. *Comput Environ Urban Syst* 29:369–399 . doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2003.12.001
- Houet T, Verburg PH, Loveland TR (2010) Monitoring and modelling landscape dynamics. *Landsc Ecol* 25:163–167 . doi: 10.1007/s10980-009-9417-x
- ISO/IEC (2014) ISO 19101-1. 48
- João E (2001) Measuring scale effects caused by map generalization and the importance of displacement. In: Tate NJ, Atkinson PM (eds) *Modelling Scale in Geographical Information Science*. Wiley, Chichester, New York, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto, pp 161–179
- Kocabas V, Dragicic S (2006) Assessing cellular automata model behaviour using a sensitivity analysis approach. *Comput Environ Urban Syst* 30:921–953 . doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2006.01.001
- Lam NS-N, Quattrochi D (1992) On the Issues of Scale, Resolution, and Fractal Analysis in the Mapping Sciences. *Prof Geogr* 44:88–98 . doi: 10.1111/j.0033-0124.1992.00088.x
- Lesschen JP, Verburg PH, Staal SJ (2005) Statistical methods for analysing the spatial dimension of changes in land use and farming systems. ILRI, LUCC Focus 3 Office, Nairobi, Wageningen
- Maeda EE, de Almeida CM, de Carvalho Ximenes A, et al (2011) Dynamic modeling of forest conversion: Simulation of past and future scenarios of rural activities expansion in the fringes of the Xingu National Park, Brazilian Amazon. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 13:435–446 . doi: 10.1016/j.jag.2010.09.008
- Mas J-F, Kolb M, Houet T, et al (2011) Éclairer le choix des outils de simulation des changements des modes d'occupation et d'usages des sols. Une approche comparative. *Rev Int Géomatique* 21:405–430 . doi: 10.3166/RIG.15.297-322
- Mas J-F, Kolb M, Paegelow M, et al (2014) Inductive pattern-based land use/cover change models: A comparison of four software packages. *Environ Model Softw* 51:94–111 . doi: 10.1016/j.envsoft.2013.09.010
- McGarigal K, Cushman SA, Neel MC, Ene E (2015) *FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical and Continuous Maps*
- Ménard A, Marceau DJ (2005) Exploration of spatial scale sensitivity in geographic cellular automata. *Environ Plan B Plan Des* 32:693–714 . doi: 10.1068/b311163
- Moreira E, Costa S, Aguiar AP, et al (2009) Dynamical coupling of multiscale land change models. *Landsc Ecol* 24:1183–1194 . doi: 10.1007/s10980-009-9397-x
- National Research Council (2014) *Advancing Land Change Modeling: Opportunities and Research Requirements*. National Academies Press, Washington, D.C.

- O'Sullivan D, Perry GLW (2013) *Spatial Simulation: Exploring Pattern and Process*. Wiley, Chichester
- Oliver MA (2001) Determining the spatial scale of variation in environmental properties using the variogram. In: Tate NJ, Atkinson PM (eds) *Modelling Scale in Geographical Information Science*. John Wiley & Sons, Chichester, New York, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto, pp 193–219
- Paegelow M, Camacho Olmedo MT (2005) Possibilities and limits of prospective GIS land cover modeling—a compared case study: Garrotxes (France) and Alta Alpujarra Granadina (Spain). *Int J Geogr Inf Sci* 19:697–722 . doi: 10.1080/13658810500076443
- Paegelow M, Camacho Olmedo MT, Mas J-F, Houet T (2014) Benchmarking of LUCC modelling tools by various validation techniques and error analysis. *Cybergeog*. doi: 10.4000/cybergeog.26610
- Pai N, Saraswat D (2013) Impact of land use and land cover categorical uncertainty on SWAT hydrologic modeling. *Trans ASABE* 56:1387–1397 . doi: 10.13031/trans.56.10062
- Pan Y, Roth A, Yu Z, Doluschitz R (2010) The impact of variation in scale on the behavior of a cellular automata used for land use change modeling. *Comput Environ Urban Syst* 34:400–408 . doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2010.03.003
- Pérez-Vega A, Mas J-F, Ligmann-Zielinska A (2012) Comparing two approaches to land use/cover change modeling and their implications for the assessment of biodiversity loss in a deciduous tropical forest. *Environ Model Softw* 29:11–23 . doi: 10.1016/j.envsoft.2011.09.011
- Pontius Jr. RG, Boersma W, Castella J-C, et al (2008) Comparing the input, output, and validation maps for several models of land change. *Ann Reg Sci* 42:11–37 . doi: 10.1007/s00168-007-0138-2
- Pontius Jr. RG, Malanson J (2005) Comparison of the structure and accuracy of two land change models. *Int J Geogr Inf Sci* 19:243–265 . doi: 10.1080/13658810410001713434
- Pontius Jr. RG, Malizia NR (2004) Effect of Category Aggregation on Map Comparison. In: Egenhofer MJ, Freksa C, Miller HJ (eds) *Geographic Information Science. Third International Conference, GIScience*. Springer, Adelphi, pp 251–268
- Pontius Jr. RG, Millones M (2011) Death to Kappa: birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. *Int J Remote Sens* 32:4407–4429 . doi: 10.1080/01431161.2011.552923
- Quattrochi DA, Emerson CW, Siu-Ngan Lam N, Qui H (2001) Fractal characterization of multitemporal remote sensing data. In: Tate NJ, Atkinson PM (eds) *Modelling Scale in Geographical Information Science*. Wiley, Chichester, New York, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto, pp 13–34
- Quattrochi DA, Goodchild MF (1997a) Scale, Multiscaling, Remote Sensing, and GIS. In: Quattrochi DA, Goodchild MF (eds) *Scale in Remote Sensing and GIS*. CRC press, Boca Raton, pp 1–11
- Quattrochi DA, Goodchild MF (1997b) *Scale in remote sensing and GIS*. CRC Press, Boca Raton
- Quiroz Ortuño Y (2009) Modelo dinámico de cambio de cobertura y uso del suelo en una zona de transición urbano-rural, entre la ciudad de Morelia y el ejido Jesús del Monte. Universidad Autónoma de México
- Renwick A, Jansson T, Verburg PH, et al (2013) Policy reform and agricultural land abandonment in the EU. *Land use policy* 30:446–457 . doi: 10.1016/j.landusepol.2012.04.005
- Rodríguez Gutiérrez F, Menéndez Fernández R, Blanco Fernández J (2009) El área metropolitana de Asturias. Ciudad Astur: el nacimiento de una estrella urbana en Europa. Trea, Oviedo
- Saura S (2002) Effects of minimum mapping unit on land cover data spatial configuration and composition. *Int J Remote Sens* 23:4853–4880 . doi: 10.1080/01431160110114493
- Schmit C, Rounsevell MDA, La Jeunesse I (2006) The limitations of spatial land use data in environmental analysis. *Environ Sci Policy* 9:174–188 . doi: 10.1016/j.envsci.2005.11.006
- Soares-Filho BS, Cerqueira GC, Pennachin CL, et al (2002) DINAMICA - a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *Ecol Modell* 154:217–235 . doi: 10.1016/S0304-3800(02)00059-5
- Soares-Filho BS, Corradi Filho L, Cerqueira GC, et al (2003) Simulating the spatial patterns of change through the use of the Dinamica model. In: Neves Epiphanyo JC, Francis Banon GJ (eds) *XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*. INPE, Belo Horizonte, pp 721–728
- Turner MG, O'Neill RV, Gardner RH, Milne BT (1989) Effects of changing spatial scale on the analysis of landscape pattern. *Landsc Ecol* 3:153–162 . doi: 10.1007/BF00131534

- Uuemaa E, Roosare J, Mander Ü (2005) Scale dependence of landscape metrics and their indicative value for nutrient and organic matter losses from catchments. *Ecol Indic* 5:350–369 . doi: 10.1016/j.ecolind.2005.03.009
- Van Delden H, Van Vliet J, Rutledge DT, Kirkby MJ (2011) Comparison of scale and scaling issues in integrated land-use models for policy support. *Agric Ecosyst Environ* 142:18–28 . doi: 10.1016/j.agee.2011.03.005
- Verburg PH, Schot P, Dijst M, Veldkamp A (2004) Land use change modelling: current practice and research priorities. *GeoJournal* 61:309–324 . doi: 10.1007/s10708-004-4946-y
- Verburg PH, de Groot WT, Veldkamp AJ (2003) Methodology for Multi-Scale Land-Use Change Modelling: Concepts and Challenges. In: Dolman AJ, Verhagen A, Rovers CA (eds) *Global Environmental Change and Land Use*. Springer, Dordrecht, pp 17–51
- Verburg PH, Neumann K, Nol L (2011) Challenges in using land use and land cover data for global change studies. *Glob Chang Biol* 17:974–989 . doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02307.x
- Verburg PH, Overmars KP (2009) Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model. *Landsc Ecol* 24:1167–1181 . doi: 10.1007/s10980-009-9355-7
- Verstegen JA, Karssenberg D, Van der Hilst F, Faaij A (2012) Spatio-temporal uncertainty in Spatial Decision Support Systems: A case study of changing land availability for bioenergy crops in Mozambique. *Comput Environ Urban Syst* 36:30–42 . doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2011.08.003
- Wainwright J, Mulligan M (2013) *Environmental Modelling: Finding Simplicity in Complexity*, 2 edition. Wiley, Chichester
- Wang F, Marceau DJ (2013) A patch-based cellular automaton for simulating land-use changes at fine spatial resolution. *Trans GIS* 17:828–846 . doi: 10.1111/tgis.12009
- Waser LT, Schwarz M (2006) Comparison of large-area land cover products with national forest inventories and CORINE land cover in the European Alps. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 8:196–207 . doi: 10.1016/j.jag.2005.10.001
- Wu J (2004) Effects of changing scale on landscape pattern analysis: Scaling relations. *Landsc Ecol* 19:125–138 . doi: 10.1023/B:LAND.0000021711.40074.ac
- Wu J, Qi Y (2000) Dealing with Scale in Landscape Analysis: An Overview. *Ann GIS* 6:1–5 . doi: 10.1080/10824000009480528
- Zhao G (2013) Effects of Spatial Scale in Cellular Automata Model for Land Use Change. In: Gaol FL (ed) *Recent Progress in Data Engineering and Internet Technology*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp 101–106
- Zong-Guo X, Clarke KC (1997) Approaches to Scaling of Geo-Spatial Data. In: Quattrochi DA, Goodchild MF (eds) *Scale in Remote Sensing and GIS*. CRC press, Boca Raton, pp 309–360

Chapter 10

- Aldwaik SZ, Onsted JA, Pontius Jr. RG (2015) Behavior-based aggregation of land categories for temporal change analysis. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 35:229–238 . doi: 10.1016/j.jag.2014.09.007
- Castilla G, Larkin K, Linke J, Hay GJ (2009) The impact of thematic resolution on the patch-mosaic model of natural landscapes. *Landsc Ecol* 24:15–23 . doi: 10.1007/s10980-008-9310-z
- Conway TM (2009) The impact of class resolution in land use change models. *Comput Environ Urban Syst* 33:269–277 . doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2009.02.001
- Delgado Hernández J (2016) Methodology of classification extraction from descriptive systems of land cover and land use
- Dietzel C, Clarke KC (2006) The effect of disaggregating land use categories in cellular automata during model calibration and forecasting. *Comput Environ Urban Syst* 30:78–101 . doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2005.04.001

- Gibson CC, Ostrom E, Ahn TK (2000) The concept of scale and the human dimensions of global change: A survey. *Ecol Econ* 32:217–239 . doi: 10.1016/S0921-8009(99)00092-0
- Gounaridis D, Koukoulas S (2016) Urban land cover thematic disaggregation, employing datasets from multiple sources and RandomForests modeling. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 51:1–10 . doi: 10.1016/j.jag.2016.04.002
- Hengl T (2006) Finding the right pixel size. *Comput Geosci* 32:1283–1298 . doi: 10.1016/j.cageo.2005.11.008
- Hewitt R, Van Delden H, Escobar F (2014) Participatory land use modelling, pathways to an integrated approach. *Environ Model Softw* 52:149–165 . doi: 10.1016/j.envsoft.2013.10.019
- Ju J, Gopal S, Kolaczyk ED (2005) On the choice of spatial and categorical scale in remote sensing land cover classification. *Remote Sens Environ* 96:62–77 . doi: 10.1016/j.rse.2005.01.016
- Pérez-Hoyos A, García-Haro FJ (2013) Evaluación de productos de cubiertas del suelo en la península ibérica. *Rev Teledetección* 40:22–40
- Pontius Jr. RG, Malanson J (2005) Comparison of the structure and accuracy of two land change models. *Int J Geogr Inf Sci* 19:243–265 . doi: 10.1080/13658810410001713434
- RIKS (2012) *Metronamica Documentation*. Maastricht
- Schmit C, Rounsevell MDA, La Jeunesse I (2006) The limitations of spatial land use data in environmental analysis. *Environ Sci Policy* 9:174–188 . doi: 10.1016/j.envsci.2005.11.006
- Šimová P, Gdulová K (2012) Landscape indices behavior: A review of scale effects. *Appl Geogr* 34:385–394 . doi: 10.1016/j.apgeog.2012.01.003
- Valcárcel Sanz N, Castaño Fernández S (2012) *Cartografía de ocupación del suelo en España*. Proyecto SI-OSE. CNIG, Madrid
- Van Delden H, Díaz-Pacheco J, Shi Y, Van Vliet J (2012) Calibration of cellular automata based land models: lessons learnt from practical experience. In: *International Symposium on Cellular Automata Modeling for Urban and Spatial Systems*. Porto, pp 8–10
- Van Vliet J, Hagen-Zanker A, Hurkens J, Van Delden H (2013) A fuzzy set approach to assess the predictive accuracy of land use simulations. *Ecol Modell* 261–262:32–42 . doi: 10.1016/j.ecolmodel.2013.03.019
- Wu H, Li ZL (2009) Scale issues in remote sensing: A review on analysis, processing and modeling. *Sensors* 9:1768–1793 . doi: 10.3390/s90301768
- Zhao G (2011) The effect of land use categories resolution on geography cellular automata model. In: *2011 International Conference on Multimedia Technology, ICMT*. IEEE, Hangzhou, China, pp 5614–5617

Chapter 11

- Aguejdad R, Doukari O, Houet T, et al (2016) Etalement urbain et géoprospective: apports et limites des modèles de spatialisation. *Cybergeog* 324:1–20 . doi: 10.4000/cybergeog.27668
- Alexander P, Prestele R, Verburg PH, et al (2015) Assessing uncertainties in land cover projections. *Glob Chang Biol in review*:1–15 . doi: 10.1111/gcb.13447
- Batisani N, Yarnal B (2009) Uncertainty awareness in urban sprawl simulations: Lessons from a small US metropolitan region. *Land use policy* 26:178–185 . doi: 10.1016/j.landusepol.2008.01.013
- Benenson I, Torrens PM (2004) *Geosimulation: object-based modeling of urban phenomena*. Wiley, West Sussex, England
- Berberoglu S, Akin A, Clarke KC (2016) Cellular automata modeling approaches to forecast urban growth for adana, Turkey: A comparative approach. *Landsc Urban Plan* 153:11–27 . doi: 10.1016/j.landurbplan.2016.04.017
- Botequilha Leitao A, Miller J, Ahern J, McGarigal K (2006) *Measuring Landscapes: A Planner's Handbook*. Island Press, Washington, Covelo, London
- Botterweg P (1995) The user's influence on model calibration results: an example of the model SOIL, independently calibrated by two users. *Ecol Modell* 81:71–81 . doi: 10.1016/0304-3800(94)00161-A
- Brown DG, Page S, Riolo R, et al (2005) Path dependence and the validation of agent-based spatial models of land use. *Int J Geogr Inf Sci* 19:153–174 . doi: 10.1080/13658810410001713399

- Camacho Olmedo MT, Mas J-F (2018) Cellular Automata in CA_MARKOV. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 425–428
- Camacho Olmedo MT, Mas J-F, Paegelow M (2018) The simulation stage in LUCC modeling. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 27–51
- Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F (2013) Interest in intermediate soft-classified maps in land change model validation: suitability versus transition potential. *Int J Geogr Inf Sci* 27:2343–2361 . doi: 10.1080/13658816.2013.831867
- Camacho Olmedo MT, Pontius Jr RG, Paegelow M, Mas J-F (2015) Comparison of simulation models in terms of quantity and allocation of land change. *Environ Model Softw* 69:214–221 . doi: 10.1016/j.envsoft.2015.03.003
- Castilla G, Hay GJ (2007) Uncertainties in land use data. *Hydrol Earth Syst Sci* 11:1857–1868 . doi: 10.5194/hess-11-1857-2007
- Chen Y, Li X, Liu X, Ai B (2013) Modeling urban land-use dynamics in a fast developing city using the modified logistic cellular automaton with a patch-based simulation strategy. *Int J Geogr Inf Sci* 28:234–255 . doi: 10.1080/13658816.2013.831868
- Clarke KC (2004) The limits of simplicity: toward geocomputational honesty in urban modeling. In: Atkinson P, Foody G, Darby S, Wu F (eds) *Geodynamics*. CRC Press, Boca Raton, pp 215–232
- Confalonieri R, Orlando F, Paleari L, et al (2016) Uncertainty in crop model predictions: What is the role of users? *Environ Model Softw* 81:165–173 . doi: 10.1016/j.envsoft.2016.04.009
- Conway TM (2009) The impact of class resolution in land use change models. *Comput Environ Urban Syst* 33:269–277 . doi: 10.1016/j.compenurbsys.2009.02.001
- Crosetto M, Tarantola S, Saltelli A (2000) Sensitivity and uncertainty analysis in spatial modelling based on GIS. *Agric Ecosyst Environ* 81:71–79 . doi: 10.1016/S0167-8809(00)00169-9
- Dendoncker N, Schmit C, Rounsevell M (2008) Exploring spatial data uncertainties in land use change scenarios. *Int J Geogr Inf Sci* 22:1013–1030 . doi: 10.1080/13658810701812836
- Díaz-Pacheco J, Hewitt R (2014) Modelado de cambios de usos de suelo urbano a través de redes neuronales artificiales. Comparación con dos aplicaciones de software. *GeoFocus*. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004
- Díaz-Pacheco J, Van Delden H, Hewitt R (2018) The importance of scale in land use models: experiments in data conversion, data resampling, resolution and neighbourhood extent. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 163–186
- Dietzel C, Clarke KC (2004) Spatial differences in multi-resolution urban automata modeling. *Trans GIS* 8:479–492 . doi: 10.1111/j.1467-9671.2004.00197.x
- Eastman JR (2015) *TerrSet Manual*. Clark University
- Eastman JR, Jin W, Kyem P, Toledano J (1995) Raster procedures for Multi-Criteria/Multi-Objective Decisions. *Photogramm Eng Remote Sensing* 61:539–547
- Eastman JR, Toledano J (2018a) A Short Presentation of CA_MARKOV. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 481–484
- Eastman JR, Toledano J (2018b) A Short Presentation of the Land Change Modeler (LCM). In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 499–505
- Elsawah S, Pierce SA, Hamilton SH, et al (2017) An overview of the system dynamics process for integrated modelling of socio-ecological systems: Lessons on good modelling practice from five case studies. *Environ Model Softw* 93:127–145 . doi: 10.1016/j.envsoft.2017.03.001
- Ferchichi A, Boulila W, Farah IR (2017) Reducing uncertainties in land cover change models using sensitivity analysis. *Knowl Inf Syst*. doi: 10.1007/s10115-017-1102-9

- García-Álvarez D (2018) The influence of scale in LULC modelling. A comparison between two different LULC maps (SIOSE and CORINE). In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 187–213
- García-Álvarez D, Camacho Olmedo MT (2016) Escala y modelización: ¿Cuál es la relación entre la escala de la cartografía LULC empleada y la extensión del área modelada? In: Galacho Jiménez FB, Vías Martínez J, Reyes Corredera S (eds) *Aplicaciones de las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) para el desarrollo económico sostenible XVII Congreso Nacional de Tecnologías de Información Geográfica*, Málaga, 29, 30 de junio y 1 de julio 2016. Grupo de Tecnologías de la Información Geográfica. Asociación de Geógrafos Españoles (AGE) y Departamento de Geografía, European Topic Centre (ETC) y Facultad de Turismo de la Universidad de Málaga, Málaga, pp 380–389
- García AM, Santé I, Crecente R, Miranda D (2011) An analysis of the effect of the stochastic component of urban cellular automata models. *Comput Environ Urban Syst* 35:289–296 . doi: 10.1016/j.compenvurb-sys.2010.11.001
- Ghosh P, Mukhopadhyay A, Chanda A, et al (2017) Application of Cellular automata and Markov-chain model in geospatial environmental modeling - A review. *Remote Sens Appl Soc Environ* 5:64–77 . doi: 10.1016/j.rsase.2017.01.005
- Grinblat Y, Gilichinsky M, Benenson I (2016) Cellular Automata Modeling of Land-Use/Land-Cover Dynamics: Questioning the Reliability of Data Sources and Classification Methods. *Ann Am Assoc Geogr* 106:1299–1320 . doi: 10.1080/24694452.2016.1213154
- Hagen-Zanker A (2006) Comparing continuous valued raster data. A cross disciplinary literature scan. *Maas-tricht*
- Hagen-Zanker A, Lajoie G (2008) Neutral models of landscape change as benchmarks in the assessment of model performance. *Landsc Urban Plan* 86:284–296 . doi: 10.1016/j.landurbplan.2008.04.002
- Hagen A (2003) Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. *Int J Geogr Inf Sci* 17:235–249 . doi: 10.1080/13658810210157822
- Hengl T (2006) Finding the right pixel size. *Comput Geosci* 32:1283–1298 . doi: 10.1016/j.cageo.2005.11.008
- Hewitt R, Díaz-Pacheco J (2017) Stable models for metastable systems? Lessons from sensitivity analysis of a Cellular Automata urban land use model. *Comput Environ Urban Syst* 62:113–124 . doi: 10.1016/j.compenvurb-sys.2016.10.011
- Hewitt R, Van Delden H, Escobar F (2014) Participatory land use modelling, pathways to an integrated approach. *Environ Model Softw* 52:149–165 . doi: 10.1016/j.envsoft.2013.10.019
- Houet T, Vacquie L, Sheeren D (2015) Evaluating the spatial uncertainty of future land abandonment in a mountain valley (Vicdessos, Pyrenees - France): Insights from model parameterization and experiments. *J Mt Sci* 12:1095–1112 . doi: 10.1007/s11629-014-3404-7
- Jakeman AJ, Letcher RA, Norton JP (2006) Ten iterative steps in development and evaluation of environmental models. *Environ Model Softw* 21:602–614 . doi: 10.1016/j.envsoft.2006.01.004
- Kamusoko C, Aniya M, Adi B, Manjoro M (2009) Rural sustainability under threat in Zimbabwe - Simulation of future land use/cover changes in the Bindura district based on the Markov-cellular automata model. *Appl Geogr* 29:435–447 . doi: 10.1016/j.apgeog.2008.10.002
- Kelly RA, B, Jakeman AJ, Barreteau O., et al (2013) Selecting among five common modelling approaches for integrated environmental assessment and management. *Environ Model Softw* 47:159–181 . doi: 10.1016/j.envsoft.2013.05.005
- Kim JH (2013) Spatiotemporal scale dependency and other sensitivities in dynamic land-use change simulations. *Int J Geogr Inf Sci* 27:1782–1803 . doi: 10.1080/13658816.2013.787145
- Kim OS (2010) An Assessment of Deforestation Models for Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation (REDD). *Trans GIS* 14:631–654 . doi: 10.1111/j.1467-9671.2010.01227.x
- Klein Goldewijk K, Verburg PH (2013) Uncertainties in global-scale reconstructions of historical land use: An illustration using the HYDE data set. *Landsc Ecol* 28:861–877 . doi: 10.1007/s10980-013-9877-x
- Kok K, Van Delden H (2009) Combining two approaches of integrated scenario development to combat desertification in the Guadalentín watershed, Spain. *Environ Plan B Plan Des* 36:49–66 . doi: 10.1068/b32137

- Krueger T, Page T, Hubacek K, et al (2012) The role of expert opinion in environmental modelling. *Environ Model Softw* 36:4–18 . doi: 10.1016/j.envsoft.2012.01.011
- Lee DB (1973) Requiem for Large-Scale Models. *J. Am. Inst. Plann.* 39:163–178
- Li W, Wu C, Zang S (2014) Modeling urban land use conversion of Daqing City, China: A comparative analysis of “top-down” and “bottom-up” approaches. *Stoch Environ Res Risk Assess* 28:817–828 . doi: 10.1007/s00477-012-0671-0
- Li X, Chen Y, Liu X, et al (2017) Experiences and issues of using cellular automata for assisting urban and regional planning in China. *Int J Geogr Inf Sci* 0:1–24 . doi: 10.1080/13658816.2017.1301457
- Liao J, Tang L, Shao G, et al (2016) Incorporation of extended neighborhood mechanisms and its impact on urban land-use cellular automata simulations. *Environ Model Softw* 75:163–175 . doi: 10.1016/j.envsoft.2015.10.014
- Lin Y-P, Chu H-J, Wu C-F, Verburg PH (2011) Predictive ability of logistic regression, auto-logistic regression and neural network models in empirical land-use change modeling—a case study. *Int J Geogr Inf Sci* 25:65–87
- Mahmoud M, Liu Y, Hartmann H, et al (2009) A formal framework for scenario development in support of environmental decision-making. *Environ Model Softw* 24:798–808 . doi: 10.1016/j.envsoft.2008.11.010
- Maier HR, Guillaume JHA, Van Delden H, et al (2016) An uncertain future, deep uncertainty, scenarios, robustness and adaptation: How do they fit together? *Environ Model Softw* 81:154–164 . doi: 10.1016/j.envsoft.2016.03.014
- Mas J-F, Kolb M, Houet T, et al (2011) Éclairer le choix des outils de simulation des changements des modes d’occupation et d’usages des sols. Une approche comparative. *Rev Int Géomatique* 21:405–430 . doi: 10.3166/RIG.15.297-322
- Mas J-F, Kolb M, Paegelow M, et al (2014) Inductive pattern-based land use/cover change models: A comparison of four software packages. *Environ Model Softw* 51:94–111 . doi: 10.1016/j.envsoft.2013.09.010
- Mas J-F, Paegelow M, Camacho Olmedo MT (2018) LUCC modeling approaches to calibration. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 1–15
- Mas J-F, Rodrigues H (2018) Cellular Automaton. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 421–424
- Mas J-F, Vega AP, Clarke KC (2010) Assessing “spatially explicit” land use / cover change models. In: Azevedo JC, Feliciano M, Castro J, Pinto MA (eds) *Forest Landscapes and Global Change-New Frontiers in Management, Conservation and Restoration*. Proceedings of the IUFRO Landscape Ecology Working Group International Conference, September 21-27, 2010. Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, pp 508–513
- Matott LS, Babendreier JE, Purucker ST (2009) Evaluating uncertainty in integrated environmental models: A review of concepts and tools. *Water Resour Res* 45:1–14 . doi: 10.1029/2008WR007301
- Mozumder C, Tripathi NK, Losiri C (2016) Comparing three transition potential models: A case study of built-up transitions in North-East India. *Comput Environ Urban Syst* 59:38–49 . doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2016.04.009
- Newland CP, Maier HR, Zecchin AC, et al (2018) Multi-objective optimisation framework for calibration of Cellular Automata land-use models. *Environ Model Softw* 100:175–200 . doi: 10.1016/j.envsoft.2017.11.012
- Omrani H, Abdallah F, Charif O, Longford NT (2015) Multi-label class assignment in land-use modelling. *Int J Geogr Inf Sci* 29:1023–1041 . doi: 10.1080/13658816.2015.1008004
- Paegelow M (2018) Impact and Integration of Multiple Training Dates for Markov Based Land Change Modeling. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 121–138
- Paegelow M, Camacho Olmedo MT, Mas J-F (2018) Techniques for the validation of LUCC modeling outputs. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 53–80

- Paegelow M, Camacho Olmedo MT, Mas J-F, Houet T (2014) Benchmarking of LUCC modelling tools by various validation techniques and error analysis. *Cybergeog*. doi: 10.4000/cybergeog.26610
- Pérez-Vega A, Mas J-F, Ligmann-Zielinska A (2012) Comparing two approaches to land use/cover change modeling and their implications for the assessment of biodiversity loss in a deciduous tropical forest. *Environ Model Softw* 29:11–23 . doi: 10.1016/j.envsoft.2011.09.011
- Pickard B, Gray J, Meentemeyer R (2017) Comparing Quantity, Allocation and Configuration Accuracy of Multiple Land Change Models. *Land* 1–21 . doi: 10.3390/land6030052
- Pontius Jr. RG (2011) Material of the Workshop "Land Change Modeling: Calibration, Validation, Extrapolation, and Interpretation". In: XIX Reunion Nacional SELPER-Mexico, 3-7 de octubre de 2011. Morelia
- Pontius Jr. RG, Boersma W, Castella J-C, et al (2008) Comparing the input, output, and validation maps for several models of land change. *Ann Reg Sci* 42:11–37 . doi: 10.1007/s00168-007-0138-2
- Pontius Jr. RG, Malanson J (2005) Comparison of the structure and accuracy of two land change models. *Int J Geogr Inf Sci* 19:243–265 . doi: 10.1080/13658810410001713434
- Pontius Jr. RG, Millones M (2011) Death to Kappa: birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. *Int J Remote Sens* 32:4407–4429 . doi: 10.1080/01431161.2011.552923
- Prestele R, Alexander P, Rounsevell MDA, et al (2016) Hotspots of uncertainty in land-use and land-cover change projections: a global-scale model comparison. *Glob Chang Biol* 22:3967–3983 . doi: 10.1111/gcb.13337
- Refsgaard JC, Drews M, Jeppesen E, et al (2013) The role of uncertainty in climate change adaptation strategies — A Danish water management example. *Mitig Adapt Strateg Glob Chang* 18:337–359 . doi: 10.1007/s11027-012-9366-6
- Refsgaard JC, Van der Sluijs JP, Højberg AL, Vanrolleghem PA (2007) Uncertainty in the environmental modelling process - A framework and guidance. *Environ Model Softw* 22:1543–1556 . doi: 10.1016/j.envsoft.2007.02.004
- Renard P, Alcolea A, Ginsbourger D (2013) Stochastic versus Deterministic Approaches. In: *Environmental Modelling*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, pp 133–149
- RIKS (2012) *Metronamica Documentation*. Maastricht
- Riveira I, Maseda RC (2006) A review of rural land-use planning models. *Environ Plan B-Planning Des* 33:165–183 . doi: 10.1068/b31073
- Rodrigues H, Soares-Filho B (2018) A Short Presentation of Dinamica EGO. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 493–498
- Rosa IMD, Purves D, Carreiras JMB, Ewers RM (2015) Modelling land cover change in the Brazilian Amazon: temporal changes in drivers and calibration issues. *Reg Environ Chang* 15:123–137 . doi: 10.1007/s10113-014-0614-z
- Sakieh Y, Salmanmahiny A, Mirkarimi SH (2016) Rules versus layers: which side wins the battle of model calibration? *Environ Monit Assess* 188: . doi: 10.1007/s10661-016-5643-2
- Shafizadeh-Moghadam H, Hagenauer J, Farajzadeh M, Helbich M (2015) Performance analysis of radial basis function networks and multi-layer perceptron networks in modeling urban change: a case study. *Int J Geogr Inf Sci* 29:606–623 . doi: 10.1080/13658816.2014.993989
- Shirley LJ, Battaglia LL (2008) Projecting Fine Resolution Land-Cover Dynamics for a Rapidly Changing Terrestrial–Aquatic Transition in Terrebonne Basin, Louisiana, U.S.A. *J Coast Res* 24:1545–1554 . doi: 10.2112/07-0903.1
- Soares-Filho B, Rodrigues H, Costa W (2009) Modeling environmental dynamics with Dinamica EGO. *Belo Horizonte*
- Soares-Filho B, Rodrigues H, Follador M (2013) A hybrid analytical-heuristic method for calibrating land-use change models. *Environ Model Softw* 43:80–87 . doi: 10.1016/j.envsoft.2013.01.010
- Soares-Filho BS, Cerqueira GC, Pennachin CL, et al (2002) DINAMICA - a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *Ecol Modell* 154:217–235 . doi: 10.1016/S0304-3800(02)00059-5

- Soares-Filho BS, Corradi Filho L, Cerqueira GC, et al (2003) Simulating the spatial patterns of change through the use of the Dinamica model. In: Neves Epiphanyo JC, Francis Banon GJ (eds) XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR. INPE, Belo Horizonte, pp 721–728
- Sohl TL, Wimberly MC, Radeloff VC, et al (2016) Divergent projections of future land use in the United States arising from different models and scenarios. *Ecol Modell* 337:281–297 . doi: 10.1016/j.ecolmodel.2016.07.016
- Tayyebi AH, Tayyebi A, Khanna N (2014) Assessing uncertainty dimensions in land-use change models: Using swap and multiplicative error models for injecting attribute and positional errors in spatial data. *Int J Remote Sens* 35:149–170 . doi: 10.1080/01431161.2013.866293
- Tong STY, Sun Y, Ranatunga T, et al (2012) Predicting plausible impacts of sets of climate and land use change scenarios on water resources. *Appl Geogr* 32:477–489 . doi: 10.1016/j.apgeog.2011.06.014
- Triantakonstantis D (2012) Urban growth prediction: a review of computational models and human perceptions. *J Geogr Inf Syst* 4:555–587 . doi: 10.4236/jgis.2012.46060
- Uusitalo L, Lehtikoinen A, Helle I, Myrberg K (2015) An overview of methods to evaluate uncertainty of deterministic models in decision support. *Environ Model Softw* 63:24–31 . doi: 10.1016/j.envsoft.2014.09.017
- Van Asselt MBA (2000) *Perspectives on Uncertainty and Risk - the PRIMA Approach to Decision Support*. Kluwer Academic Publishers, Boston, Dordrecht, London
- Van Delden H, Hagen-Zanker A (2009) New Ways of Supporting Decision Making: Linking Qualitative Storylines with Quantitative Modelling. In: Geertman S, Stillwell J (eds) *Planning Support Systems Best Practice and New Methods*. Springer, pp 347–367
- Van Delden H, Seppelt R, White R, Jakeman AJ (2011a) A methodology for the design and development of integrated models for policy support. *Environ Model Softw* 26:266–279 . doi: 10.1016/j.envsoft.2010.03.021
- Van Delden H, Stuczynski T, Ciaian P, et al (2010) Integrated assessment of agricultural policies with dynamic land use change modelling. *Ecol Modell* 221:2153–2166 . doi: 10.1016/j.ecolmodel.2010.03.023
- Van Delden H, Van Vliet J, Petersen JJ-E, et al (2012) Exploring land use trends in Europe: A comparison of forecasting approaches and results. In: Seppelt R, Voinov AA, Langre S, Bankamp D (eds) *iEMSs 2012 - Managing Resources of a Limited Planet: Proceedings of the 6th Biennial Meeting of the International Environmental Modelling and Software Society*. International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs), Leipzig
- Van Delden H, Van Vliet J, Rutledge DT, Kirkby MJ (2011b) Comparison of scale and scaling issues in integrated land-use models for policy support. *Agric Ecosyst Environ* 142:18–28 . doi: 10.1016/j.agee.2011.03.005
- Van Delden H, Vanhout R (2018) A Short Presentation of Metronamica. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 511–519
- Van Der Kwast J, Poelmans L, Van De Voorde T, et al (2012) Uncertainty analysis and data-assimilation of remote sensing data for the calibration of cellular automata based land-use models. In: Seppelt R, Voinov AA, Langre S, Bankamp D (eds) *iEMSs 2012 - Managing Resources of a Limited Planet: Proceedings of the 6th Biennial Meeting of the International Environmental Modelling and Software Society*. International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs), Leipzig
- Van Schrojenstein Lantman J, Verburg PH, Bregt A, Geertman S (2011) Core Principles and Concepts in Land-Use Modelling: A Literature Review. In: Koomen E, Borsboom-Van Beurden J (eds) *Land-Use Modelling in Planning Practice*. Springer, Dordrecht, Heidelberg, London, New York, pp 35–57
- Van Vliet J, Bregt AK, Brown DG, et al (2016) A review of current calibration and validation practices in land-change modeling. *Environ Model Softw* 82:174–182 . doi: 10.1016/j.envsoft.2016.04.017
- Van Vliet J, Bregt AK, Hagen-Zanker A (2011) Revisiting Kappa to account for change in the accuracy assessment of land-use change models. *Ecol Modell* 222:1367–1375 . doi: 10.1016/j.ecolmodel.2011.01.017

- Van Vliet J, Hagen-Zanker A, Hurkens J, Van Delden H (2013a) A fuzzy set approach to assess the predictive accuracy of land use simulations. *Ecol Modell* 261–262:32–42 . doi: 10.1016/j.ecolmodel.2013.03.019
- Van Vliet J, Hurkens J, White R, Van Delden H (2012) An activity-based cellular automaton model to simulate land-use dynamics. *Environ Plan B Plan Des* 39:198–212 . doi: 10.1068/b36015
- Van Vliet J, Naus N, Van Lammeren RJA, et al (2013b) Measuring the neighbourhood effect to calibrate land use models. *Comput Environ Urban Syst* 41:55–64 . doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2013.03.006
- Verburg PH, Tabeau A, Hatna E (2013) Assessing spatial uncertainties of land allocation using a scenario approach and sensitivity analysis: A study for land use in Europe. *J Environ Manage* 127:S132–S144 . doi: 10.1016/j.jenvman.2012.08.038
- Verburg PH, Van De Steeg J, Veldkamp A, Willemsen L (2009) From land cover change to land function dynamics: a major challenge to improve land characterization. *J Environ Manage* 90:1327–1335 . doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.08.005>
- Verstegen JA, Karssenberg D, Van der Hilst F, Faaij A (2012) Spatio-temporal uncertainty in Spatial Decision Support Systems: A case study of changing land availability for bioenergy crops in Mozambique. *Comput Environ Urban Syst* 36:30–42 . doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2011.08.003
- Villa N, Paegelow M, Camacho Olmedo MT, et al (2007) Various Approaches for Predicting Land Cover in Mountain Areas. *Commun Stat - Simul Comput* 36:73–86 . doi: 10.1080/03610910601096379
- Wainwright J, Mulligan M (2013) *Environmental Modelling: Finding Simplicity in Complexity*, 2 edition. Wiley, Chichester
- Walker WE, Harremoës P, Rotmans J, et al (2003) Defining Uncertainty: A Conceptual Basis for Uncertainty Management in Model-Based Decision Support. *Integr Assess* 4:5–17 . doi: <https://doi.org/10.1076/iaij.4.1.5.16466>
- Wardekker JA, Van der Sluijs JP, Janssen PHM, et al (2008) Uncertainty communication in environmental assessments: views from the Dutch science-policy interface. *Environ Sci Policy* 11:627–641 . doi: 10.1016/j.envsci.2008.05.005
- White R, Engelen G (1993) Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns. *Environ Plan A* 25:1175–1199 . doi: 10.1068/a251175
- White R, Engelen G, Uljee I (1997) The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land-use dynamics. *Environ Plan B Plan Des* 24:323–343 . doi: 10.1068/b240323
- White R, Engelen G, Uljee I (2015) *Modeling cities and regions as complex systems: from theory to planning applications*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England
- Wu F (2002) Calibration of stochastic cellular automata: the application to rural-urban land conversions. *Int J Geogr Inf Sci* 16:795–818 . doi: 10.1080/13658810210157769
- Yeh AG-O, Li X (2006) Errors and uncertainties in urban cellular automata. *Comput Environ Urban Syst* 30:10–28 . doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2004.05.007

Chapter 12

- Aguejedad R, Houet T, Hubert L (2017) Spatial Validation of Land Use Change Models Using Multiple Assessment Techniques: A Case Study of Transition Potential Models. *Environ Model Assess*. doi: 10.1007/s10666-017-9564-4
- Ascough JC, Maier HR, Ravalico JK, Strudley MW (2008) Future research challenges for incorporation of uncertainty in environmental and ecological decision-making. *Ecol Modell* 219:383–399 . doi: 10.1016/j.ecolmodel.2008.07.015
- Benito del Pozo P (2006) Promoción Y Valorización Del Suelo Industrial En Asturias. *Boletín la Asoc Geógrafos Españoles* 42:99–120
- Blanchard SD, Pontius Jr. RG, Urban KM (2015) Implications of Using 2 m versus 30 m Spatial Resolution Data for Suburban Residential Land Change Modeling. *J Environ Informatics* 25:1–13 . doi: 10.3808/jei.201400284

- Botterweg P (1995) The user's influence on model calibration results: an example of the model SOIL, independently calibrated by two users. *Ecol Modell* 81:71–81 . doi: 10.1016/0304-3800(94)00161-A
- Brown JD (2004) Knowledge, uncertainty and physical geography: towards the development of methodologies for questioning belief. *Trans Inst Br Geogr* 24:367–381 . doi: 10.1111/j.0020-2754.2004.00342.x
- Castilla G, Hay GJ (2007) Uncertainties in land use data. *Hydrol Earth Syst Sci* 11:1857–1868 . doi: 10.5194/hess-11-1857-2007
- Chuvieco E (2016) *Fundamentals of Satellite Remote Sensing. An environmental approach*, 2 edition. CRC Press, Boca Raton
- Confalonieri R, Orlando F, Paleari L, et al (2016) Uncertainty in crop model predictions: What is the role of users? *Environ Model Softw* 81:165–173 . doi: 10.1016/j.envsoft.2016.04.009
- Dietzel C, Clarke KC (2006) The effect of disaggregating land use categories in cellular automata during model calibration and forecasting. *Comput Environ Urban Syst* 30:78–101 . doi: 10.1016/j.compenvurb-sys.2005.04.001
- Elsawah S, Pierce SA, Hamilton SH, et al (2017) An overview of the system dynamics process for integrated modelling of socio-ecological systems: Lessons on good modelling practice from five case studies. *Environ Model Softw* 93:127–145 . doi: 10.1016/j.envsoft.2017.03.001
- Fritz S, See L, McCallum I, et al (2011) Highlighting continued uncertainty in global land cover maps for the user community. *Environ Res Lett* 6:44005 . doi: 10.1088/1748-9326/6/4/044005
- Funtowicz SO, Ravetz JR (1993) Science for the post-normal age. *Futures* 25:739–755 . doi: 10.1016/0016-3287(93)90022-L
- García AM, Santé I, Crecente R, Miranda D (2011) An analysis of the effect of the stochastic component of urban cellular automata models. *Comput Environ Urban Syst* 35:289–296 . doi: 10.1016/j.compenvurb-sys.2010.11.001
- Goodchild MF (2011) Scale in GIS: An overview. *Geomorphology* 130:5–9 . doi: 10.1016/j.geomorph.2010.10.004
- Grinblat Y, Gilichinsky M, Benenson I (2016) Cellular Automata Modeling of Land-Use/Land-Cover Dynamics: Questioning the Reliability of Data Sources and Classification Methods. *Ann Am Assoc Geogr* 106:1299–1320 . doi: 10.1080/24694452.2016.1213154
- Kamusoko C (2012) Markov–Cellular Automata in Geospatial Analysis. In: Muruyama Y (ed) *Progress in Geospatial Analysis*. Springer, Tokyo, Heidelberg, New York, Dordrecht, London, pp 107–124
- Kocabas V, Dragicic S (2006) Assessing cellular automata model behaviour using a sensitivity analysis approach. *Comput Environ Urban Syst* 30:921–953 . doi: 10.1016/j.compenvurb-sys.2006.01.001
- Leao SZ (2016) Assessing the trade-off between data quality and spatial resolution for the Thornthwaite Moisture Index mapping. *J Spat Sci* 8596:1–18 . doi: 10.1080/14498596.2016.1220871
- Lee DB (1973) Requiem for Large-Scale Models. *J. Am. Inst. Plann.* 39:163–178
- Leyk S, Boesch R, Weibel R (2005) A conceptual framework for uncertainty investigation in map-based land cover change modelling. *Trans GIS* 9:291–322 . doi: 10.1111/j.1467-9671.2005.00220.x
- Li H, Wu J (2006) Uncertainty analysis in ecological studies: an overview. In: Wu J, Jones KB, Li H, Loucks OL (eds) *Scaling and Uncertainty Analysis in Ecology: Methods and Applications*. Springer, Dordrecht, pp 45–66
- Lloyd CD (2014) *Exploring Spatial Scale in Geography*. Wiley, Chichester
- Longley PA, Goodchild MF, Maguire DJ, Rhind DW (2011) *Geographical Information Systems and Science*, 2 edition. Wiley, Chichester
- Lowell KE (2008) Uncertainty in Landscape Models: Sources, Impacts and Decision Making. In: Pettit C, Cartwright W, Bishop I, et al. (eds) *Landscape Analysis and Visualisation*. Berlin, Heidelberg, pp 367–382
- Magliocca NR, Van Vliet J, Brown C, et al (2015) From meta-studies to modeling: Using synthesis knowledge to build broadly applicable process-based land change models. *Environ Model Softw* 72:10–20 . doi: 10.1016/j.envsoft.2015.06.009

- Maier HR, Guillaume JHA, Van Delden H, et al (2016) An uncertain future, deep uncertainty, scenarios, robustness and adaptation: How do they fit together? *Environ Model Softw* 81:154–164 . doi: 10.1016/j.envsoft.2016.03.014
- Meentemeyer V (1989) Geographical perspectives of space, time, and scale. *Landsc Ecol* 3:163–173 . doi: 10.1007/BF00131535
- Ménard A, Marceau DJ (2005) Exploration of spatial scale sensitivity in geographic cellular automata. *Environ Plan B Plan Des* 32:693–714 . doi: 10.1068/b31163
- Mustafa A, Saadi I, Cools M, Teller J (2014) Measuring the Effect of Stochastic Perturbation Component in Cellular Automata Urban Growth Model. *Procedia Environ Sci* 22:156–168 . doi: 10.1016/j.proenv.2014.11.016
- Nol L, Verburg PH, Heuvelink GBM, Molenaar K (2008) Effect of land cover data on nitrous oxide inventory in fen meadows. *J Environ Qual* 37:1209–1219 . doi: Doi 10.2134/Jeq2007.0438
- Prestele R, Alexander P, Rounsevell MDA, et al (2016) Hotspots of uncertainty in land-use and land-cover change projections: a global-scale model comparison. *Glob Chang Biol* 22:3967–3983 . doi: 10.1111/gcb.13337
- Refsgaard JC, Drews M, Jeppesen E, et al (2013) The role of uncertainty in climate change adaptation strategies — A Danish water management example. *Mitig Adapt Strateg Glob Chang* 18:337–359 . doi: 10.1007/s11027-012-9366-6
- Refsgaard JC, Van der Sluijs JP, Højberg AL, Vanrolleghem PA (2007) Uncertainty in the environmental modelling process - A framework and guidance. *Environ Model Softw* 22:1543–1556 . doi: 10.1016/j.envsoft.2007.02.004
- Romero J (2010) Construcción residencial y gobierno del territorio en España. De la burbuja especulativa a la recesión. Causas y consecuencias. *Cuad Geogr* 47:17–46
- Sohl TL, Wimberly MC, Radeloff VC, et al (2016) Divergent projections of future land use in the United States arising from different models and scenarios. *Ecol Modell* 337:281–297 . doi: 10.1016/j.ecolmodel.2016.07.016
- Van Asselt MBA (2000) *Perspectives on Uncertainty and Risk - the PRIMA Approach to Decision Support*. Kluwer Academic Publishers, Boston, Dordrecht, London
- Van Delden H, Van Vliet J, Rutledge DT, Kirkby MJ (2011) Comparison of scale and scaling issues in integrated land-use models for policy support. *Agric Ecosyst Environ* 142:18–28 . doi: 10.1016/j.agee.2011.03.005
- Van Vliet J, Bregt AK, Brown DG, et al (2016) A review of current calibration and validation practices in land-change modeling. *Environ Model Softw* 82:174–182 . doi: 10.1016/j.envsoft.2016.04.017
- Verburg PH, Neumann K, Nol L (2011) Challenges in using land use and land cover data for global change studies. *Glob Chang Biol* 17:974–989 . doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02307.x
- Verburg PH, Tabeau A, Hatna E (2013) Assessing spatial uncertainties of land allocation using a scenario approach and sensitivity analysis: A study for land use in Europe. *J Environ Manage* 127:S132–S144 . doi: 10.1016/j.jenvman.2012.08.038
- Walker WE, Harremoës P, Rotmans J, et al (2003) Defining Uncertainty: A Conceptual Basis for Uncertainty Management in Model-Based Decision Support. *Integr Assess* 4:5–17 . doi: <https://doi.org/10.1076/iaij.4.1.5.16466>
- Warmink JJ, Janssen JAEB, Booij MJ, Krol MS (2010) Identification and classification of uncertainties in the application of environmental models. *Environ Model Softw* 25:1518–1527 . doi: 10.1016/j.envsoft.2010.04.011
- Wu J (2007) Scale and scaling: a cross-disciplinary perspective. In: Wu J, Hobbs RJ (eds) *Key Topics in Landscape Ecology*. Cambridge University Press, Cambridge, New York, pp 115–142

Technical note A

- Aburas MM, Ho YM, Ramli MF, Ash'aari ZH (2017) Improving the capability of an integrated CA-Markov model to simulate spatio-temporal urban growth trends using an Analytical Hierarchy Process and Frequency Ratio. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 59:65–78 . doi: 10.1016/j.jag.2017.03.006
- Bayes T (1763) An Essay Towards Solving a Problem in the Doctrines of Chances. *Philos Trans* 53:370–418 . doi: 10.1093/biomet/45.3-4.293
- Camacho Olmedo MT (2018) Multi-objective Land Allocation (MOLA). In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 457–460
- Camacho Olmedo MT, Mas J-F (2018) Cellular Automata in CA_MARKOV. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 425–428
- Camacho Olmedo MT, Mas J-F, Paegelow M (2018) The simulation stage in LUCC modeling. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 27–51
- Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F (2013) Interest in intermediate soft-classified maps in land change model validation: suitability versus transition potential. *Int J Geogr Inf Sci* 27:2343–2361 . doi: 10.1080/13658816.2013.831867
- Camacho Olmedo MT, Pontius Jr RG, Paegelow M, Mas J-F (2015) Comparison of simulation models in terms of quantity and allocation of land change. *Environ Model Softw* 69:214–221 . doi: 10.1016/j.envsoft.2015.03.003
- Eastman JR (2015) *TerrSet Manual*. Clark University
- Eastman JR, Jin W, Kyem P, Toledano J (1995) Raster procedures for Multi-Criteria/Multi-Objective Decisions. *Photogramm Eng Remote Sensing* 61:539–547
- Eastman JR, Toledano J (2018a) A Short Presentation of CA_MARKOV. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 481–484
- Eastman JR, Toledano J (2018b) A Short Presentation of the Land Change Modeler (LCM). In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 499–505
- Escobar F (2018) The NASZ Model. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 461–464
- Galacho Jiménez FB, Arrebola Castaño JA (2013) Modelo de evaluación de la capacidad de acogida del territorio con SIG y técnicas de decisión multicriterio respecto a la implantación de edificaciones en espacios rurales. *Investig Geográficas*. doi: 10.14198/INGEO2013.60.04
- Ghosh P, Mukhopadhyay A, Chanda A, et al (2017) Application of Cellular automata and Markov-chain model in geospatial environmental modeling - A review. *Remote Sens Appl Soc Environ* 5:64–77 . doi: 10.1016/j.rsase.2017.01.005
- Gómez Delgado M, Barredo JI (2006) *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*, 2 edition. Ra-Ma, Madrid
- Hewitt R, Van Delden H, Escobar F (2014) Participatory land use modelling, pathways to an integrated approach. *Environ Model Softw* 52:149–165 . doi: 10.1016/j.envsoft.2013.10.019
- Kamusoko C (2012) Markov–Cellular Automata in Geospatial Analysis. In: Muruyama Y (ed) *Progress in Geospatial Analysis*. Springer, Tokyo, Heidelberg, New York, Dordrecht, London, pp 107–124
- Maeda EE, de Almeida CM, de Carvalho Ximenes A, et al (2011) Dynamic modeling of forest conversion: Simulation of past and future scenarios of rural activities expansion in the fringes of the Xingu National Park, Brazilian Amazon. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 13:435–446 . doi: 10.1016/j.jag.2010.09.008
- Mas J-F (2018) Weights of Evidence. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 469–471

- Mas J-F, Kolb M, Paegelow M, et al (2014) Inductive pattern-based land use/cover change models: A comparison of four software packages. *Environ Model Softw* 51:94–111 . doi: 10.1016/j.envsoft.2013.09.010
- Mas J-F, Paegelow M, Camacho Olmedo MT (2018) LUCC modeling approaches to calibration. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 1–15
- Paegelow M (2018) Multi Criteria Evaluacion (MCE). In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 447–449
- Paegelow M, Camacho Olmedo MT (2005) Possibilities and limits of prospective GIS land cover modeling—a compared case study: Garrotxes (France) and Alta Alpujarra Granadina (Spain). *Int J Geogr Inf Sci* 19:697–722 . doi: 10.1080/13658810500076443
- Paegelow M, Camacho Olmedo MT, Mas J-F (2018) Techniques for the validation of LUCC modeling outputs. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 53–80
- RIKS (2012) *Metronamica Documentation*. Maastricht
- Rodrigues H, Soares-Filho B (2018) A Short Presentation of Dinamica EGO. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 493–498
- Sakieh Y, Salmanmahiny A, Mirkarimi SH (2016) Rules versus layers: which side wins the battle of model calibration? *Environ Monit Assess* 188: . doi: 10.1007/s10661-016-5643-2
- Sinha P, Kimar L (2013) Markov Land Cover Change Modeling Using Pairs of Time-Series Satellite Images. *Photogramm Eng Remote Sens* 79:1–15 . doi: 10.14358/PERS.79.11.1037
- Soares-Filho B, Rodrigues H, Costa W (2009) Modeling environmental dynamics with Dinamica EGO. *Belo Horizonte*
- Taud H, Mas J-F (2018) Multilayer Perceptron (MLP). In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 451–455
- Van Delden H, Van Vliet J, Rutledge DT, Kirkby MJ (2011) Comparison of scale and scaling issues in integrated land-use models for policy support. *Agric Ecosyst Environ* 142:18–28 . doi: 10.1016/j.agee.2011.03.005
- Van Delden H, Vanhout R (2018) A Short Presentation of Metronamica. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 511–519
- Van Vliet J, Naus N, Van Lammeren RJA, et al (2013) Measuring the neighbourhood effect to calibrate land use models. *Comput Environ Urban Syst* 41:55–64 . doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2013.03.006
- Verburg PH, de Nijs TCM, Van Eck JR, et al (2004) A method to analyse neighbourhood characteristics of land use patterns. *Comput Environ Urban Syst* 28:667–690 . doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2003.07.001
- White R, Engelen G (1993) Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns. *Environ Plan A* 25:1175–1199 . doi: 10.1068/a251175
- White R, Engelen G (1997) Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling. *Environ Plan B Plan Des* 24:235–246 . doi: https://doi.org/10.1068/b240235
- White R, Engelen G, Uljee I (1997) The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land-use dynamics. *Environ Plan B Plan Des* 24:323–343 . doi: 10.1068/b240323

Technical note B

- Aguilera-Benavente F, Botequilha-Leitão A, Díaz-Varela E (2014) Detecting multi-scale urban growth patterns and processes in the Algarve region (Southern Portugal). *Appl Geogr* 53:234–245 . doi: 10.1016/j.apgeog.2014.06.019

- Aguilera-Benavente F, Valenzuela LM, Botequilha-Leitão A (2011) Landscape metrics in the analysis of urban land use patterns: A case study in a Spanish metropolitan area. *Landsc Urban Plan* 99:226–238 . doi: 10.1016/j.landurbplan.2010.10.004
- Aldwaik SZ, Pontius Jr. RG (2012) Intensity analysis to unify measurements of size and stationarity of land changes by interval, category, and transition. *Landsc Urban Plan* 106:103–114 . doi: 10.1016/j.landurbplan.2012.02.010
- Botequilha Leitao A, Miller J, Ahern J, McGarigal K (2006) *Measuring Landscapes: A Planner's Handbook*. Island Press, Washington, Covelo, London
- Bradley A V., Rosa IMD, Pontius Jr. RG, et al (2016) SimiVal, a multi-criteria map comparison tool for land-change model projections. *Environ Model Softw* 82:229–240 . doi: 10.1016/j.envsoft.2016.04.016
- Cohen J (1960) A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. *Educ Psychol Meas* 20:37–46
- Frazier AE, Kedron P (2016) Impact of compositional and configurational data loss on downscaling accuracy. In: Bailly JS, Griffith D, Josselin D (eds) *International symposium on "Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences."* ISARA, Montpellier, pp 190–194
- Gergel SE (2007) *New Directions in Landscape Pattern Analysis and Linkages with Remote Sensing*. In: Wulder MA, Franklin SE (eds) *Understanding Forest Disturbance and Spatial Pattern*. CRC Press, Boca Raton, London, New York, pp 173–208
- Hagen-Zanker A (2006) Comparing continuous valued raster data. A cross disciplinary literature scan. *Maas-tricht*
- Hagen A (2002) Multi-method assessment of map similarity. In: 5th AGILE Conference on Geographic Information Science. Mallorca, pp 1–8
- Hagen A (2003) Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. *Int J Geogr Inf Sci* 17:235–249 . doi: 10.1080/13658810210157822
- Herold M, Couclelis H, Clarke KC (2005) The role of spatial metrics in the analysis and modeling of urban land use change. *Comput Environ Urban Syst* 29:369–399 . doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2003.12.001
- Landis JR, Koch GG (1977) The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics* 33:159–174
- Li H, Wu J (2004) Use and misuse of landscape indices. *Landsc Ecol* 19:389–399 . doi: 10.1023/B:LAND.0000030441.15628.d6
- Lloyd CD (2010) *Spatial Data Analysis: An Introduction for GIS Users*. Oxford University Press, Oxford, New York
- Mcgarigal K Landscape metrics for Categorical Map Patterns. 77
- McGarigal K, Cushman SA, Neel MC, Ene E (2015) *FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical and Continuous Maps*
- Moran PAP (1950) Notes on Continuous Stochastic Phenomena. *Biometrika* 37:17 . doi: 10.2307/2332142
- Mukaka MM (2012) A guide to appropriate use of Correlation coefficient in medical research. *Malawi Med J* 24:69–71 . doi: 10.1016/j.cmpb.2016.01.020
- Olaya V (2014) *Sistemas de Información Geográfica*
- Paegelow M (2018) LUCC Budget. In: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 437–440
- Pontius, Jr. RG, Millones M (2008) Problems and solutions for Kappa-based indices of agreement. In: *Studying, Modeling, and Sense Making of Planet Earth*. Mytilene, Lesvos
- Pontius Jr. RG (2000) Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. *Photogramm Eng Remote Sensing* 66:1011–1016
- Pontius Jr. RG, Boersma W, Castella J-C, et al (2008) Comparing the input, output, and validation maps for several models of land change. *Ann Reg Sci* 42:11–37 . doi: 10.1007/s00168-007-0138-2
- Pontius Jr. RG, Huffaker D, Denman K (2004a) Useful techniques of validation for spatially explicit land-change models. *Ecol Modell* 179:445–461 . doi: 10.1016/j.ecolmodel.2004.05.010
- Pontius Jr. RG, Millones M (2011) Death to Kappa: birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. *Int J Remote Sens* 32:4407–4429 . doi: 10.1080/01431161.2011.552923

- Pontius Jr. RG, Santacruz A (2014) Quantity, exchange, and shift components of difference in a square contingency table. *Int J Remote Sens* 35:7543–7554 . doi: 10.1080/2150704X.2014.969814
- Pontius Jr. RG, Shusas E, McEachern M (2004b) Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agric Ecosyst Environ* 101:251–268 . doi: 10.1016/j.agee.2003.09.008
- RIKS (2010) Map Comparison Kit 3. User manual. Maastricht
- Šimová P, Gdulová K (2012) Landscape indices behavior: A review of scale effects. *Appl Geogr* 34:385–394 . doi: 10.1016/j.apgeog.2012.01.003
- Turner MG, Gardner RH (2015) *Landscape Ecology in Theory and Practice*, 2 edition. Springer, New York, Heidelberg, Dordrecht, London
- Van Vliet J, Bregt AK, Brown DG, et al (2016) A review of current calibration and validation practices in land-change modeling. *Environ Model Softw* 82:174–182 . doi: 10.1016/j.envsoft.2016.04.017
- Van Vliet J, Bregt AK, Hagen-Zanker A (2011) Revisiting Kappa to account for change in the accuracy assessment of land-use change models. *Ecol Modell* 222:1367–1375 . doi: 10.1016/j.ecolmodel.2011.01.017
- Van Vliet J, Hagen-Zanker A, Hurkens J, Van Delden H (2013) A fuzzy set approach to assess the predictive accuracy of land use simulations. *Ecol Modell* 261–262:32–42 . doi: 10.1016/j.ecolmodel.2013.03.019
- Vila i Subirós J, Varga i Linde D, Llausàs Pascual A, Ribas i Palom A (2006) Conceptes i mètodes fonamentals en ecologia del paisatge («landscape ecology»): una interpretació des de la geografia. In: *Documents d'anàlisi geogràfica*. pp 151–166
- Wu J (2004) Effects of changing scale on landscape pattern analysis: Scaling relations. *Landsc Ecol* 19:125–138 . doi: 10.1023/B:LAND.0000021711.40074.ae

Anexos

Anexo 1

Relación de publicaciones

Parte se esta tesis queda conformada por un conjunto de publicaciones de distinto tipo. A continuación, se detalla cada una de ellas, indicando en cada caso sus índices de calidad.

Artículos en revistas de prestigio internacional

- García-Álvarez D, Camacho Olmedo MT (2017) Changes in the methodology used in the production of the Spanish CORINE: Uncertainty analysis of the new maps. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 63:55–67 . doi: 10.1016/j.jag.2017.07.001.

JCR 2016

Factor de Impacto: 3.930 (Q1)

SJR 2016

H Index: 57 (Q1)

Capítulos de libro en editoriales de prestigio internacional

- García-Álvarez D, Van Delden H, Camacho Olmedo MT, Paegelow M. Uncertainty challenge in Geospatial analysis. An approximation from the Land Use Cover Change Modelling perspective. En: Koutsopoulos K, de Miguel González R, Donert K (eds) *Geospatial Challenges in the 21st Century*. Springer. Aceptado

SPI 2014

Ranking general

Editoriales extranjeras mejor valoradas: Springer 4º posición. ICEE: 33.060.

Ranking Geografía

Editoriales extranjeras mejor valoradas: Springer 3º posición. ICEE: 1.421000.

- García-Álvarez D (2018) The influence of scale in LULC modelling. A comparison between two different LULC maps (SIOSE and CORINE). En: Camacho Olmedo MT, Paegelow M, Mas J-F, Escobar F (eds) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer, Cham, Switzerland, pp 187–213

SPI 2014

Ranking general

Editoriales extranjeras mejor valoradas: Springer 4º posición. ICEE: 33.060.

Ranking Geografía

Editoriales extranjeras mejor valoradas: Springer 3º posición. ICEE: 1.421000.

Actas de congreso

- García-Álvarez D, Camacho Olmedo MT. Mapas para el estudio de los cambios de Usos y Coberturas del Suelo. Estado de la cuestión. En: I Congreso Internacional de las Montañas, Sierra Nevada 2018. Granada. Aceptado

Congreso internacional

- García-Álvarez D, Camacho Olmedo MT (2017) Consecuencias de la elección de la resolución temática en la calibración de un modelo de Usos y Coberturas del Suelo. En: Allende Álvarez F, Cañada Torrecilla R, Fernández-Mayorales G, et al. (eds) Naturaleza, Territorio y Ciudad en un Mundo Global. Actas del XXV Congreso de la Asociación de Geógrafos Españoles. UAM Ediciones, Madrid, pp 1275–1284.

Congreso Nacional.

SPI 2014

Ranking general

Editoriales españolas mejor valoradas: UAM Ediciones 96º posición. ICEE: 1.722.

Ranking Geografía

Editoriales españolas mejor valoradas: UAM Ediciones 29º posición. ICEE: 0.060.

Artículos en revisión

- García-Álvarez D, Camacho Olmedo MT, Van Delden H, Mas, JF, Paegelow, M. Global uncertainty analysis in LUCC modelling through the comparison of four model software packages. Environ Model Softw. En revisión

ICR 2016

Factor de Impacto: 4.404 (Q1)

SJR 2016

H Index: 98 (Q1)



14th February 2018

TO WHOM IT MAY CONCERN

This is to confirm that the chapter titled “Uncertainty challenge in Geospatial analysis. An approximation from the Land Use Cover Change Modelling perspective” whose authors are David García-Álvarez, Hedwig Van Delden, Maria Teresa Camacho Olmedo and Martin Paegelow has been accepted for publication as part of the book “Geospatial Challenges in the 21st Century” and is currently under double-blind peer review.

The book will take part of the book series “Key Challenges in Geography”, which will be published by Springer International Publishing AG. The book editors are Kostis Koutsopoulos, Rafael de Miguel González and Karl Donert,

Yours sincerely



Rafael de Miguel González
Book editor and VicePresident of the European Association of Geographers

Anexo 2

Guion de entrevista a expertos

Entrevistas a expertos

Datos del entrevistado

Nombre

Profesión

Fecha Entrevista

Limitación del área central de Asturias

Opinión respecto a la delimitación realizada bajo criterios cuantitativos.

¿Corresponde con la realidad? ¿Cabría realizar modificaciones?

Dinámicas recientes del área central

¿Cuáles son, en general, las principales tendencias de cambio que se han dado en los últimos años (siglo XX)?

De forma concreta, ¿Cuáles son los cambios más destacables acontecidos en los últimos años, representativos de las principales dinámicas del ámbito de estudio? Mencionar proyectos concretos o actuaciones destacadas, que hayan supuesto un gran impacto territorial o bien hayan dado origen a grandes tendencias de cambio.

Factores de cambio

¿Cuáles son las principales variables (*driving forces*) o factores que han determinado (tanto recientemente como en la actualidad) las dinámicas de cambio del área central de Asturias?

Preferiblemente, se deben mencionar variables que posean una componente espacial

Fuentes de información

Mención de estudios o investigaciones relevantes en el área de estudio

Identificación de principales expertos en el ámbito de su estudio y su problemática.
Preferible identificación de personalidades con formaciones distintas, es decir, una muestra de expertos interdisciplinar

¿Hay otros expertos, actores o personas relevantes que puedan aportar información al objeto de estudio de la tesis?

Otras posibles fuentes de información o consideraciones a tener en cuenta

Anexo 3

Material adicional del Capítulo 7

En este anexo se recogen las referencias y enlaces referidos en las tablas del Capítulo 7, donde no han podido ser mostrados debido a la falta de espacio.

Referencias mapas LULC

- [1] Hansen MC, Defries RS, Townshend JRG, Sohlberg R (2000) Global land cover classification at 1 km spatial resolution using a classification tree approach. *Int J Remote Sens* 21:1331–1364 . doi: 10.1080/014311600210209
- [2] DeFries RS, Hansen MC, Townshend JRG, Sohlberg R (1995) Global land cover classification at 8 km spatial resolution: the use of training data derived from Landsat imagery in decision tree classifiers. *Remote Sens Environ* 19:3141–3168
- [3] Defries RS, Townshend JRG (1994) NDVI-Derived Land Cover Classifications At a Global Scale. *Int J Remote Sens* 15:3567–3586 . doi: 10.1080/01431169408954345
- [4] Loveland TR, Reed BC, Ohlen DO, et al (2000) Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data. *Int J Remote Sens* 21:1303–1330 . doi: 10.1080/014311600210191
- [5] ESA (2017) Land Cover CCI. Product User Guide. Version 2.0
- [6] Bartholomé E, Belward AS (2005) GLC2000: A new approach to global land cover mapping from earth observation data. *Int J Remote Sens* 26:1959–1977 . doi: 10.1080/01431160412331291297
- [7] Chen J, Chen J, Liao A, et al (2014) Global land cover mapping at 30 m resolution: A POK-based operational approach. *ISPRS J Photogramm Remote Sens* 103:7–27 . doi: 10.1016/j.isprsjprs.2014.09.002
- [8] Yu L, Wang J, Li X, et al (2014) A multi-resolution global land cover dataset through multisource data aggregation. *Sci China Earth Sci* 57:2317–2329 . doi: 10.1007/s11430-014-4919-z
- [9] Gong P, Wang J, Yu L, et al (2013) Finer resolution observation and monitoring of global land cover: First mapping results with Landsat TM and ETM+ data. *Int J Remote Sens* 34:2607–2654 . doi: 10.1080/01431161.2012.748992
- [10] See L, Schepaschenko D, Lesiv M, et al (2015) Building a hybrid land cover map with crowdsourcing and geographically weighted regression. *ISPRS J Photogramm Remote Sens* 103:48–56 . doi: 10.1016/j.isprsjprs.2014.06.016
- [11] Friedl MA, McIver DK, Hodges JCF, et al (2002) Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results. *Remote Sens Environ* 83:287–302 . doi: 10.1016/S0034-4257(02)00078-0
- [12] Friedl MA, Sulla-Menashe D, Tan B, et al (2010) MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets. *Remote Sens Environ* 114:168–182 . doi: 10.1016/j.rse.2009.08.016
- [13] Tateishi R, Uriyangqai B, Al-Bilbisi H, et al (2011) Production of global land cover data - GLCNMO. *Int J Digit Earth* 4:22–49 . doi: 10.1080/17538941003777521
- [14] Tateishi R, Hoan NT, Kobayashi T, et al (2014) Production of Global Land Cover Data – GLCNMO2008. *J Geogr Geol* 6:99–122 . doi: 10.5539/jgg.v6n3p99

- [15] Kobayashi T, Tateishi R, Alsaadeh B, et al (2017) Production of Global Land Cover Data – GLCNMO2013. *J Geogr Geol* 9:1 . doi: 10.5539/jgg.v9n3p1
- [16] Bontemps S, Defourny P, Van Bogaert E, et al (2011) GLOBCOVER 2009 Products Description and Validation Report
- [17] Latham J, Cumani R, Rosati I, Bloise M (2014) Global Land Cover SHARE (GLC-SHARE) Database Beta-Release Version 1.0-2014
- [18] Pesaresi M, Ehrlich D, Ferri S, et al (2016) Operating procedure for the production of the Global Human Settlement Layer from Landsat data of the epochs 1975, 1990, 2000, and 2014
- [19] Smets B, Van Best C, Camacho F (2014) Gio Global Land Component - Lot I” Operation of the Global Land Component”: Product User Manual, Top Of Canopy Reflectance (TOC-R)
- [20] Sexton JO, Song XP, Feng M, et al (2013) Global, 30-m resolution continuous fields of tree cover: Landsat-based rescaling of MODIS vegetation continuous fields with lidar-based estimates of error. *Int J Digit Earth* 6:427–448 . doi: 10.1080/17538947.2013.786146
- [21] Townshend JRG, Hansen MC, Carroll M, et al (2011) User guide for the MODIS Vegetation Continuous fields product. Collection 5 version 1
- [22] Hansen MC, Potapov P V., Moore R, et al (2013) High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science* (80-) 342:850–853 . doi: 10.1126/science.1244693
- [23] JAXA, EORC (2016) Global 25m Resolution PALSAR-2 / PALSAR Mosaic and Forest / Non-Forest Map (FNF). Dataset Description
- [24] Shimada M, Itoh T, Motooka T, et al (2014) New global forest/non-forest maps from ALOS PALSAR data (2007-2010). *Remote Sens Environ* 155:13–31 . doi: 10.1016/j.rse.2014.04.014
- [25] European Environment Agency (2007) CLC2006 technical guidelines
- [26] Múcher CA (2000) PELCOM. Final report
- [27] European Commission (2016) Mapping Guide v4.7 for a European Urban Atlas
- [28] European Environment Agency (2015) Natura 2000. Product specifications (short version)
- [29] Palacios M, Richter R, Larsson K (2015) CS-3/17 (D2.0) Final Nomenclature Guideline. Issue 3.0
- [30] Langangke T (2015) GIO land (GMES/Copernicus initial operations land) High Resolution Layers (HRLs) – summary of product specifications
- [31] Ferri S, Siragusa A, Sabo F, et al (2017) The European Settlement Map 2017 Release
- [32] Equipo Técnico Nacional SIOSE (2015) Documento Técnico SIOSE 2011. Versión 1.1

Enlaces de descarga mapas LULC

- [a] <http://glcf.umd.edu/data/landcover/>
- [b] https://daac.ornl.gov/ISLSCP_II/guides/edc_landcover_xdeg.html
- [c] <http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/index.php>
- [d] <http://forobs.jrc.ec.europa.eu/products/glc2000/glc2000.php>
- [e] <http://www.globallandcover.com>
- [f] <http://data.ess.tsinghua.edu.cn/>
- [g] <https://www.geo-wiki.org>

- [h] <http://glcf.umd.edu/data/lc/>
- [i] <https://globalmaps.github.io/glcnm.html>
- [j] http://due.esrin.esa.int/page_globcover.php
- [k] <https://goo.gl/8p7cXg>
- [l] <http://ghsl.jrc.ec.europa.eu/about.php>
- [m] <http://land.copernicus.eu/global/products/fcover>
- [n] <http://glcf.umd.edu/data/landsatTreecover>
- [ñ] <http://glcf.umd.edu/data/vcf/>
- [o] <https://goo.gl/QHkw3h>
- [p] <https://goo.gl/2Li5cY>
- [q] <http://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>
- [r] <http://www.geo-informatie.nl/projects/pelcom/index.htm>
- [s] <https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas/view>
- [t] <http://land.copernicus.eu/local/natura>
- [u] <https://land.copernicus.eu/local/riparian-zones/land-cover-land-use-lclu-image/view>
- [v] <http://land.copernicus.eu/pan-european/high-resolution-layers>
- [w] <https://land.copernicus.eu/pan-european/GHSL/european-settlement-map/view>
- [x] http://www.mapama.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/cartografia_informacion_disp.aspx
- [y] http://www.mapama.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/directorio_datos_servicios/agricultura/default.aspx (Solo visualizador disponible)
- [z] <http://www.siose.es/descargar>

Appendix 4

Supplementary material to Chapter 8

Here the reader can find the full version of the summary tables showed in the section 8.5.3 of this thesis. The tables provide information of SIOSE classes (light grey) present in CLC classes (dark grey) for CLC06t (light orange) and CLC06g (light red). This information has not been showed in the Chapter 8 due to lack of space.

Urban classes

CLC		Discontinuous urban fabric			
SIOSE	Isolated buildings	Buildings between party walls	Detached family house	Semi-detached family house	Industrial unit
CLC06t					
1-25%	7.37%	2.00%	15.87%	1.06%	1.86%
25-50%	4.61%	6.82%	12.54%	4.19%	5.26%
50-75%	0.43%	4.96%	0.99%	1.78%	2.94%
75-100%	0.00%	0.49%	0.15%	0.04%	0.22%
CLC06g					
1-25%	6.91%	5.96%	20.71%	0.56%	2.26%
25-50%	3.08%	11.56%	18.57%	3.82%	1.53%
50-75%	0.30%	8.15%	1.54%	0.62%	1.00%
75-100%	0.07%	0.61%	0.21%	0.04%	0.15%

CLC		Discontinuous urban fabric			
SIOSE	Isolated buildings	Buildings between party walls	Detached family house	Semi-detached family house	Industrial unit
CLC06t					
1-25%	0.46%	-3.96%	-4.84%	0.49%	-0.40%
25-50%	1.54%	-4.74%	-6.03%	0.36%	3.72%
50-75%	0.13%	-3.19%	-0.54%	1.16%	1.93%
75-100%	-0.07%	-0.12%	-0.07%	0.00%	0.08%
CLC06g					
1-25%	-0.46%	3.96%	4.84%	-0.49%	0.40%
25-50%	-1.54%	4.74%	6.03%	-0.36%	-3.72%
50-75%	-0.13%	3.19%	0.54%	-1.16%	-1.93%
75-100%	0.07%	0.12%	0.07%	0.00%	-0.08%

Agricultural classes

CLC		Non-irrigated arable lands		
SIOSE	Pastures	Non-irrigated crops	Irrigated crops	Fruit trees
CLC06t				
1-25%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
25-50%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
50-75%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
75-100%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
CLC06g				
1-25%	3.17%	36.99%	0.39%	24.03%
25-50%	19.45%	29.92%	0.10%	0.98%
50-75%	39.14%	12.44%	0.03%	0.18%
75-100%	29.38%	3.32%	0.23%	0.11%
CLC		Irrigated crops		
SIOSE	Pastures	Non-irrigated crops	Irrigated crops	Fruit trees
CLC06t				
1-25%	7.21%	14.43%	0.00%	26.45%
25-50%	29.25%	26.38%	0.00%	2.72%
50-75%	35.07%	18.08%	0.00%	4.03%
75-100%	3.41%	0.00%	0.00%	0.00%
CLC06g				
1-25%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
25-50%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
50-75%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
75-100%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
CLC		Fruit trees		
SIOSE	Pastures	Non-irrigated crops	Irrigated crops	Fruit trees
CLC06t				
1-25%	19.90%	28.55%	0.00%	27.74%
25-50%	41.63%	0.00%	0.00%	12.46%
50-75%	11.59%	0.00%	0.00%	20.02%
75-100%	13.02%	0.00%	0.00%	16.68%
CLC06g				
1-25%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
25-50%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
50-75%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
75-100%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

CLC		Pastures		
SIOSE	Pastures	Non-irrigated crops	Irrigated crops	Fruit trees
CLC06t				
1-25%	4.94%	32.29%	0.43%	25.41%
25-50%	14.42%	9.52%	0.07%	2.62%
50-75%	21.05%	3.87%	0.02%	0.86%
75-100%	44.94%	0.99%	0.08%	0.28%
CLC06g				
1-25%	2.62%	33.29%	0.40%	23.82%
25-50%	7.96%	2.44%	0.04%	1.47%
50-75%	11.26%	0.51%	0.02%	0.29%
75-100%	70.47%	0.11%	0.04%	0.24%
CLC		Complex cultivation patterns		
SIOSE	Pastures	Non-irrigated crops	Irrigated crops	Fruit trees
CLC06t				
1-25%	7.17%	38.77%	0.73%	31.85%
25-50%	25.57%	3.73%	0.00%	14.39%
50-75%	17.25%	0.66%	0.00%	8.06%
75-100%	36.68%	1.35%	0.18%	4.20%
CLC06g				
1-25%	5.96%	41.98%	0.56%	47.31%
25-50%	26.95%	3.14%	0.09%	14.45%
50-75%	28.25%	1.45%	0.03%	6.77%
75-100%	28.48%	0.75%	0.08%	2.34%
CLC		Land principally occupied by agriculture		
SIOSE	Pastures	Non-irrigated crops	Irrigated crops	Fruit trees
CLC06t				
1-25%	11.15%	22.98%	0.11%	21.35%
25-50%	8.94%	1.59%	0.00%	1.12%
50-75%	12.92%	0.53%	0.00%	0.16%
75-100%	36.45%	0.13%	0.01%	0.02%
CLC06g				
1-25%	7.78%	20.70%	0.15%	22.08%
25-50%	18.55%	2.98%	0.05%	1.46%
50-75%	27.24%	1.04%	0.00%	0.39%
75-100%	25.26%	0.41%	0.01%	0.29%

Natural vegetation classes

CLC		Broad-leaved forest			
SIOSE	Broad-leaved trees	Conifers	Grassland	Shrub	
CLC06t					
1-25%	12.77%	1.31%	40.38%	55.41%	
25-50%	6.66%	0.20%	4.03%	18.91%	
50-75%	21.83%	0.19%	1.20%	5.53%	
75-100%	46.68%	0.42%	1.23%	5.09%	
CLC06g					
1-25%	7.83%	1.85%	44.70%	60.96%	
25-50%	9.56%	0.25%	4.00%	20.80%	
50-75%	24.72%	0.15%	1.21%	5.49%	
75-100%	51.60%	0.11%	1.17%	2.41%	
CLC		Coniferous forest			
SIOSE	Broad-leaved trees	Conifers	Grassland	Shrub	
CLC06t					
1-25%	18.63%	24.71%	17.34%	24.09%	
25-50%	11.49%	14.52%	5.26%	29.57%	
50-75%	3.64%	8.25%	2.99%	18.30%	
75-100%	6.00%	27.90%	1.37%	17.67%	
CLC06g					
1-25%	7.05%	1.87%	37.82%	48.58%	
25-50%	2.28%	8.55%	2.51%	31.53%	
50-75%	2.90%	28.34%	1.41%	8.43%	
75-100%	3.26%	48.10%	0.33%	1.16%	
CLC		Mixed forest			
SIOSE	Broad-leaved trees	Conifers	Grassland	Shrub	
CLC06t					
1-25%	18.48%	31.60%	36.60%	47.35%	
25-50%	15.05%	8.19%	0.71%	27.50%	
50-75%	13.77%	2.31%	0.00%	2.35%	
75-100%	33.30%	3.18%	5.77%	5.27%	
CLC06g					
1-25%	19.97%	13.97%	17.40%	13.33%	
25-50%	14.72%	12.48%	2.57%	61.59%	
50-75%	54.41%	1.39%	0.54%	17.50%	
75-100%	3.40%	0.10%	3.10%	1.42%	

CLC		Grasslands		
SIOSE	Broad-leaved trees	Conifers	Grassland	Shrub
CLC06t				
1-25%	36.55%	0.37%	17.15%	55.08%
25-50%	3.95%	0.06%	47.71%	10.18%
50-75%	3.93%	0.00%	11.74%	9.78%
75-100%	4.31%	0.00%	10.88%	12.42%
CLC06g				
1-25%	25.72%	1.68%	11.64%	27.20%
25-50%	2.67%	0.02%	5.07%	21.44%
50-75%	2.62%	0.19%	20.53%	4.55%
75-100%	2.73%	0.49%	47.27%	6.50%
CLC		Moors and heathland		
SIOSE	Broad-leaved trees	Conifers	Grassland	Shrub
CLC06t				
1-25%	22.73%	1.77%	35.32%	14.71%
25-50%	4.95%	0.50%	7.37%	13.12%
50-75%	6.36%	0.65%	3.42%	14.40%
75-100%	7.78%	0.30%	4.73%	44.15%
CLC06g				
1-25%	30.47%	2.70%	34.08%	10.43%
25-50%	3.38%	0.07%	13.13%	8.85%
50-75%	2.46%	0.09%	4.06%	16.45%
75-100%	3.18%	0.08%	2.46%	58.15%
CLC		Woodland shrub		
SIOSE	Broad-leaved trees	Conifers	Grassland	Shrub
CLC06t				
1-25%	25.44%	3.15%	41.33%	34.13%
25-50%	10.79%	0.19%	6.94%	17.39%
50-75%	17.17%	1.25%	2.78%	9.05%
75-100%	20.63%	0.41%	2.46%	19.31%
CLC06g				
1-25%	54.30%	3.35%	25.78%	32.55%
25-50%	17.53%	0.00%	33.36%	13.00%
50-75%	12.36%	0.00%	8.19%	24.37%
75-100%	3.44%	0.00%	1.06%	17.44%