



ugr | Universidad
de **Granada**



Programa Doctorado
Ciencias de la Tierra

ANÁLISIS DE LA PELIGROSIDAD FRENTE A LOS MOVIMIENTOS DE LADERA EN LA CUENCA DE LOJA (ECUADOR)

John Egverto Soto Luzuriaga

TESIS DOCTORAL

2018

Facultad de Ciencias de la Tierra

UNIVERSIDAD DE GRANADA-ESPAÑA

Editor: Universidad de Granada. Tesis Doctorales
Autor: John Egverto Soto Luzuriaga
ISBN: 978-84-9163-848-3
URI: <http://hdl.handle.net/10481/51128>



ugr | Universidad
de **Granada**



Programa Doctorado
Ciencias de la Tierra

José Miguel Azañón Hernández, Catedrático de la Universidad de Granada, Departamento de Geodinámica, y **Clemente Irigaray Fernández**, Catedrático de la Universidad de Granada, Departamento de Ingeniería Civil, ETSICCP.

HACEN CONSTAR:

Que la presente tesis titulada “**Análisis de la peligrosidad frente a los movimientos de ladera en la cuenca de Loja (Ecuador)**” ha sido realizada bajo nuestra dirección coordinada y cumple las condiciones suficientes para que su autor, **John Egverto Soto Luzuriaga**, opte al grado de Doctor en Ciencias de la Tierra por la Universidad de Granada.

Granada, Marzo de 2018

Vº Bº de los Directores

Fdo. José Miguel Azañón H.

Fdo. Clemente Irigaray Fernández

El doctorando **John Egverto Soto Luzuriaga** y los directores de la tesis D. **José Miguel Azañón Hernández** y D. **Clemente Irigaray Fernández** garantizamos, al firmar esta tesis doctoral, que el trabajo ha sido realizado por el doctorando bajo nuestra dirección y hasta donde nuestro conocimiento alcanza, en la realización del trabajo, se han respetado los derechos de otros autores al ser citados, cuando se han utilizado sus resultados o publicaciones.

Granada, Marzo de 2018

Directores de la Tesis



Fdo. José Miguel Azañón H.



Fdo. Clemente Irigaray Fernández

Doctorando



Fdo. John Egverto Soto Luzuriaga

DEDICATORIA

Con especial cariño y amor, a mi familia:

A mi esposa Sandra.

A mis hijos:

Daniel.
John
Milenny,
Katherine,

Quienes han sido la fuente de inspiración y fortaleza.

AGRADECIMIENTO

Al haber llegado a culminar el presente trabajo, me complace inmensamente el poder expresar mi inmenso agradecimiento a todas las personas que han hecho posible la culminación de esta etapa de mi vida.

A los directores de este trabajo: D. José Miguel Azañón Hernández y D. Clemente Irigaray Fernández, por su confianza depositada en mi persona para el desarrollo de este trabajo, por su dirección e implicación, por su ánimo, amistad y enseñanzas para llevar a buen término la culminación de del mismo. Quienes además muy acertadamente me presentaron a dos personas extraordinarias con quienes he tenido la gran suerte de continuar acompañado hasta el final de este camino, para ellos mi infinito agradecimiento.

Estas personas son: Jorge Pedro Galve, mi especial agradecimiento por su apoyo, ánimo y gran predisposición para impartirme sus conocimientos sobre el análisis espacial y sus enseñanzas en el análisis de los resultados que se obtienen, en la revisión y correcciones tanto en la estructura como redacción de este trabajo. A José Antonio Palenzuela, igualmente mi agradecimiento por su amistad e inmenso apoyo y acompañamiento sobre todo en el análisis de los datos de precipitación e importantes consejos y ánimo para llegar a buen puerto con este trabajo.

También mi agradecimiento a Francisco Lamas por su continuo apoyo, preocupación y consejos para continuar adelante en este reto. Igualmente a Jesús Galindo, Manuel López Chicano, Rachid El Hamdouni, José Rodríguez Montero, Mercedes Feriche, Manuel Navarro, José Benavente, Patricia Ruano y todos quienes conforman el departamento de Geodinámica de la Universidad de Granada. Así como, a José Tamay, gran amigo y compañero del programa de doctoral, con quien hemos afrontado este reto y nos hemos apoyado en estas

largas estancias fuera de la familia y de nuestra tierra. También a mis amigos de la Escuela de Geología y Minas de la Universidad Técnica Particular de Loja.

Y, por supuesto infinitas gracias a mi familia. A mi esposa Sandra, sin cuyo apoyo, amor y ánimo cuando más lo necesitaba no habría sido posible continuar en esta lucha y vencer las adversidades de salud que la vida nos pone por delante; y así, llegar a culminar esta meta. A mis hijos: Daniel, John, Milenny y Katherine, por haberles abandonado tanto tiempo fuera de casa y no haber podido compartir aquellos momentos que hubieran requerido de mi acompañamiento (espero su comprensión). A mi madre y a mis hermanos (Rolando, Tania y James); así como, a mis suegros Fernando y Elva por su continuo apoyo.

“A todos ustedes, personas maravillosas de un noble corazón y sincera amistad “MIS INFINITAS GRACIAS”.

Igualmente dejo constancia de mi agradecimiento a la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) por su financiación para el estudio de este doctorado y a La Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador (UTPL) por su apoyo institucional.

RESUMEN

Los movimientos de ladera forman parte de los procesos denudativos que modelan el relieve de la tierra. Están ocasionados por una diversidad de factores, tanto geológicos (tectónicos, sismos), hidrometeorológicos (clima, precipitación), químicos y mecánicos (meteorización, erosión) ocurridos en la corteza terrestre, así como otros de carácter antrópico (actividades agrícolas, urbanizaciones, vías, etc.). Estos factores llevan de forma implícita la posibilidad de ocurrencia de movimientos de ladera. Estas inestabilidades de ladera son muy recurrentes a nivel mundial, sobre todo en la región andina y por ende en el Ecuador, en donde ocasionalmente son catastróficos y producen graves pérdidas socioeconómicas, ambientales y de vidas humanas. Todo esto ha conducido a una vasta producción científica sobre el tema de susceptibilidad y peligrosidad ante los movimientos de ladera con varios enfoques metodológicos, que contribuyan a mitigar el peligro que estos eventos representan.

Siendo Loja, una de las ciudades ubicadas al Sur de los Andes Ecuatorianos y que continuamente se ve afectada por movimientos de ladera, se planteó aplicar este estudio a esta ciudad. Por tanto, uno de los principales objetivos de esta tesis es el reconocimiento geográfico de las zonas inestables, y la generación del mapa de peligrosidad frente a los movimientos de ladera.

Para lo cual el trabajo realizado ha incluido actividades como la generación de inventarios de movimientos de ladera y cartografía temática que se ha utilizado para la estimación de los factores condicionantes. En total se generaron catorce mapas a escala 1:5.000, todos ellos gestionados en un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Se realizó el análisis detallado de cuatro movimientos de ladera a fin de conocer sus características geotécnicas y la cinemática de los mismos, aplicando diferentes técnicas como: métodos geodésicos (DGPS), geofísicos (ERT), geotécnicos y mineralógicos. Esto ha permitido extraer información fiable sobre los materiales implicados en los planos de deslizamiento, composición mineralógica de esos materiales, profundidades, y velocidades de desplazamiento.

Para el análisis de la susceptibilidad se han aplicado y comparado dos métodos estadísticos-probabilísticos: el método de la “**Matriz**” que es un método estadístico bivariante, basado en la construcción de una matriz, de modo que cada una de sus celdas representa cada una de las combinaciones de las clases de factores considerados, que luego se cruza con el inventario para calcular el área afectada por movimientos en cada combinación de factores. Además, se usó el método de “**Likelihood ratio**”. Este método matemático consiste en un enfoque probabilístico que se fundamenta en las Funciones de Favorabilidad (FF) y utiliza el análisis de datos espaciales para construir modelos predictivos (como los mapas de susceptibilidad).

Los resultados obtenidos de la susceptibilidad se validaron independientemente utilizando un inventario de test, que no se involucró en el análisis de susceptibilidad, e igualmente comprobando su grado de ajuste, validaciones que arrojaron resultados favorables para ambos métodos. Estos resultados permitieron establecer los factores condicionantes cuyas combinaciones dan mejores predicciones de susceptibilidad. Dichos factores son la litología, la pendiente, el relieve, las fallas, el índice de posición topográfica (TPI) y el uso del suelo, para los dos métodos aplicados.

Para definir los factores desencadenantes se ha realizado un análisis de umbrales de lluvia que ha permitido establecer su función como factor desencadenante de

los movimientos de ladera. Para ello, se parte de una búsqueda de información institucional y de prensa para obtener un “inventario temporal” que consiste en un catálogo de fechas y localizaciones de los movimientos de ladera ocurridos en Loja. Estos datos se integran con análisis de series temporales de precipitación para obtener la estimación de los llamados Critical Rainfall Threshold (CRT); es decir, la cantidad y/o intensidad de las lluvias que desencadenaron los movimientos de ladera. El cálculo se basa en una recopilación extensa de datos asociados a 153 movimientos de ladera ocurridos en los últimos 10 años (año 2006 a 2015).

Los resultados muestran que el 76% de los eventos de lluvia que provocaron movimientos de ladera en el área de estudio tienen períodos de retorno de menos de un año y se concentran de febrero a abril. Esto refleja la alta frecuencia temporal de estos fenómenos meteorológicos potencialmente dañinos en el área de estudio. Un hallazgo interesante es que el número de eventos de lluvia que desencadenaron movimientos de ladera se incrementó en los últimos años de la serie: 2011, 2012, 2014 y 2015. Además, 2015 fue el año con mayor número de movimientos registrados, y los eventos de lluvia durante este año muestran períodos de retorno de aproximadamente 10 años (lluvia acumulada entre 190 y 238 mm, con duraciones entre 11 y 15 días, e intensidades entre 16 mm/día a 17 mm/día), con un máximo de 17,3 años (lluvia acumulada de 190 mm en 10 días, y una intensidad de 19 mm/día).

Igualmente, se generó un inventario multitemporal de movimientos de ladera considerando tres periodos de tiempo diferentes (de 1999 a 2003, de 2003 a 2010 y de 2010 a 2015). Esto permitió obtener una frecuencia de ocurrencia de movimientos de ladera durante un periodo de 16 años, que luego se utiliza para la estimación de la peligrosidad. Después de realizar este análisis se concluye que anualmente 31.604,527 píxeles (unidades de terreno) favorecen la generación de movimientos de ladera teniendo en cuenta los tres periodos (16

años). Lo que corresponde a 284.441,14 m² de terreno movido al año, y que el número esperado de movimientos de ladera que ocurriría por año es de 19,4.

El modelo de peligrosidad de movimientos de ladera se ha derivado a partir del modelo de susceptibilidad generado con una media entre el método de la “Matriz” y el método “Likelihood ratio”, cuya combinación ofrecía una mayor capacidad predictiva (coeficiente de validación de 0,78). Los resultados de este modelo indican que en el área ocupada por las tres clases de mayor peligrosidad (media, alta y muy alta) ocurren o se reactivan alrededor de 22 deslizamientos al año y en la zona de baja y muy baja peligrosidad sean alrededor de 4 movimientos de ladera al año.

Por último, es importante añadir que este ha sido uno de los pocos casos en el mundo donde ha sido posible validar, aunque sea de manera preliminar, el modelo de peligrosidad de movimientos de ladera. Los resultados muestran que el modelo pronostica razonablemente bien la distribución de los movimientos de ladera ocurridos durante los años 2016-17, lo que indica que a partir del enfoque propuesto y la hipótesis formulada se pueden preparar mapas de susceptibilidad y peligrosidad cuantitativos con una alta fiabilidad.

ABSTRACT

The landslides are part of the denudative processes that model the relief of the earth. They are caused by a variety of factors, both geological (tectonic, earthquake), hydrometeorological (climate, precipitation), chemical and mechanical (weathering, erosion) occurred in the earth's crust, as well as other anthropic (agricultural activities, urbanizations, roads, etc.). These factors implicitly lead to the possibility of occurrence of landslides. These slope instabilities are very recurrent worldwide, especially in the Andean region and therefore in Ecuador, where they are occasionally catastrophic and produce serious socio-economic, environmental and human life losses. All this has led to a vast scientific production on the subject of susceptibility and hazard to landslides with various methodological approaches, which contribute to mitigate the danger that these events represent.

Being Loja, one of the cities located south of the Ecuadorian Andes and that is continually affected by landslides, it was proposed to apply this study to this city. Therefore, one of the main objectives of this thesis is the geographical recognition of unstable areas, and the generation of the landslide hazard map. For this objective the work done has included activities such as the generation of inventories of landslides and thematic cartography that has been used for the estimation of the conditioning factors. In total, fourteen maps were generated at a scale of 1: 5,000, all of them managed in a Geographic Information System (GIS). The detailed analysis of four landslides was carried out in order to know their geotechnical characteristics and their kinematics, applying different techniques such as: geodetic (DGPS), geophysical (ERT), geotechnical and mineralogical methods. This has allowed extracting reliable information on the materials involved in the landslide planes, mineralogical composition of these materials, depths, and travel speeds.

For the analysis of susceptibility, two statistical-probabilistic methods have been applied and compared: the "Matrix" method, which is a bivariate statistical method, based on the construction of a matrix, so that each of its cells represents each one of the combinations of the classes of factors considered, that then is crossed with the inventory to calculate the area affected by landslides for each factor combination. Additionally, the "Likelihood ratio" method was used. This mathematical method consists of a probabilistic approach that is based on Favorability Functions (FF) and utilizes the spatial data analysis to build predictive models (such as susceptibility maps).

The results obtained from the susceptibility were validated independently using a test inventory, which was not involved in the susceptibility analysis, and also checking its degree of adjustment, validations that yielded favourable results for both methods. These results allowed establishing the conditioning factors whose combinations give better predictions of susceptibility. These factors are lithology, slope, relief, faults, topographic position index (TPI) and land use, for the two applied methods.

In order to define the triggering factors, an analysis of rainfall thresholds has been carried out, which has allowed establishing their function as a landslide trigger. To do this, we started with a search of institutional and press information to obtain a "temporary inventory" consisting of a catalog of dates and locations of landslides that occurred in Loja. These data were integrated with a time series analysis on precipitation to estimate the so-called Critical Rainfall Threshold (CRT); that is, the quantity and / or intensity of the rains that triggered the landslides. This calculation is based on an extensive collection of data associated with 153 landslides that occurred in the last 10 years (2006 to 2015).

The results show that 76% of rainfall events that caused landslides in the study area have return periods of less than one year and are concentrated from

February to April. This reflects the high temporal frequency of these potentially damaging meteorological phenomena in the study area. An interesting finding is that the number of rain events that triggered landslides increased in the last years of the series: 2011, 2012, 2014 and 2015. In addition, 2015 was the year with the highest number of registered landslides, and the rainfall events during this year showed return periods of approximately 10 years (accumulated rainfall between 190 and 238 mm, with durations between 11 and 15 days, and intensities between 16 mm/day to 17 mm/day), with a maximum of 17.3 years (cumulative rainfall of 190 mm in 10 days, and an intensity of 19 mm/day).

Likewise, a multitemporal landslide inventory was generated considering three different periods of time (from 1999 to 2003, from 2003 to 2010 and from 2010 to 2015). This allowed obtaining the landslide frequency for a period of 16 years, which is then used for the hazard estimation. After carrying out this analysis, it is concluded that annually 31.604,527 pixels (terrain units) favour the generation of landslide taking into account the three periods (16 years). This corresponds to 284.441,14 m² of land moved per year, and that the expected number of landslides per year is 19,4.

The landslide hazard model has been derived from the susceptibility model generated with an average between the "Matrix" method and the "Likelihood ratio" method, whose combination offered a greater predictive capacity (validation coefficient of 0,78). The results of this model indicate that in the area occupied by the three most dangerous classes (medium, high and very high) about 22 landslides occur per year and in the area of low and very low dangerousness they are about 4 landslides per year.

Finally, it is important to add that this has been one of the few cases in the world where it has been possible to validate, even in a preliminary way, the landslide hazard model. The results show that the model predicts reasonably well the

distribution of landslides during the years 2016-17, which indicates that, based on the proposed approach and the formulated hypothesis, the quantitative susceptibility and hazard maps can be prepared with high reliability.

INDICE GENERAL

CAPÍTULO I	1
1.1 JUSTIFICACIÓN	5
1.2 OBJETIVOS	11
1.3 METODOLOGÍA GENERAL	12
1.3.1 Recopilación de información	12
1.3.2 Generación de cartografía temática.....	17
1.3.3 Caracterización geotécnica y dinámica de los movimientos de ladera	23
1.3.4 Análisis de la susceptibilidad	24
1.3.5 Análisis de peligrosidad	25
1.4 ESTADO DEL CONOCIMIENTO	26
1.4.1 Inestabilidad de los movimientos de ladera	26
1.4.2 Tipos de inventarios según su naturaleza y rango temporal.....	27
1.4.3 Aplicaciones de los SIG en los estudios de movimientos de ladera.....	28
CAPÍTULO II	39
CARACTERÍSTICAS FÍSICO GEOGRÁFICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO	39
2.1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA	41
2.2 RASGOS FISIAGRÁFICOS, RELIEVE E HIDROLOGÍA	42
2.3 CLIMA Y VEGETACIÓN	43
2.4 CONTEXTO SOCIOECONÓMICO	45
2.5 CONTEXTO GEOLÓGICO	48
CAPÍTULO III	59
GENERACIÓN DE INVENTARIOS Y CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA Y DINÁMICA DE LOS MOVIMIENTOS DE LADERA	59
3.1 MAPA DE INVENTARIO DE MOVIMIENTOS DE LADERA	61
3.1.1 Mapa de inventario multitemporales.....	65
3.2 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA Y DINÁMICA DE MOVIMIENTOS DE LADERA	69
3.2.1 Características generales de los movimientos de ladera seleccionados.....	69

3.2.2 Metodología aplicada a los cuatro casos	72
3.2.3 Resultados obtenidos de los cuatro casos seleccionados	81
3.2.4 Discusión de resultados de los 4 casos estudiados	92
3.2.5 Conclusiones de la caracterización de los cuatro casos	94
CAPÍTULO IV	95
ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE MOVIMIENTOS DE LADERA	95
4.1 ELABORACIÓN DE BASE DE DATOS DE FACTORES CONDICIONANTES	98
4.1.1 Mapas de variables derivadas del MDT	98
4.1.2 Mapas temáticos	122
4.2 METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD	156
4.2.1 Modelo de susceptibilidad aplicando el método de la relación de probabilidades.	158
4.2.2 Modelo de susceptibilidad utilizando el método de la “Matriz” ...	166
4.2.3 Método de evaluación de variables condicionantes y modelos de susceptibilidad	168
4.3 SELECCIÓN PRELIMINAR DE VARIABLES CONDICIONANTES	173
4.4 RESULTADOS DE MODELOS DE SUSCEPTIBILIDAD	176
CAPÍTULO V	183
ANÁLISIS DE FACTORES DESENCADENANTES	183
5.1 SISMICIDAD	185
5.2 PRECIPITACIÓN	188
5.2.1 Introducción	188
5.2.2 Materiales y métodos	191
5.2.3 Análisis de series temporales pluviométricas.....	195
5.2.4 Resultados	196
CAPÍTULO VI	207
6.1 ANÁLISIS DE LA TASA DE RECURRENCIA DE MOVIMIENTOS DE LADERA OCURRIDOS EN LOJA.....	210
6.2 METODOLOGÍA UTILIZADA PARA EL ANÁLISIS DE LA PELIGROSIDAD	211
6.3 RESULTADOS DE PELIGROSIDAD.....	214

6.4 VALIDACIÓN PRELIMINAR.....	218
CAPÍTULO VII.....	221
DISCUSIÓN GENERAL.....	221
CAPÍTULO VIII.....	235
CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.....	235
BIBLIOGRAFIA.....	243
ANEXOS.....	275

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN GENERAL

La población mundial ha crecido a ritmo casi exponencial desde los años 50, trayendo como consecuencia una expansión tanto en las grandes urbes como en los municipios de provincia, ejerciendo una mayor presión sobre el territorio. Esta presión, por un lado repercute en el aumento de los elementos del territorio expuestos al riesgo, en la expresión clásica del riesgo de Varnes (1984), y por otro puede reactivar, acelerar o aumentar la frecuencia de los fenómenos peligrosos, potencialmente generadores de riesgo. En este sentido, los movimientos de ladera representan un problema a escala mundial que han provocado miles de víctimas mortales y billones de dólares en pérdidas económicas en todo el mundo. Estas pérdidas se podrían reducir si estos fenómenos se identificaran y se adoptaran las medidas oportunas a tiempo (Brabb 1991).

Los mapas de inventario, susceptibilidad y peligrosidad del terreno frente a los movimientos de ladera representan una de las principales medidas para la prevención y mitigación de las pérdidas producidas por estos procesos (Corominas 1992). La caracterización del peligro se expresa usualmente en forma de cartografía mediante la zonación del territorio. Los mapas resultantes (mapas de susceptibilidad y peligrosidad) son una herramienta básica para la planificación del territorio (Irigaray et al. 2000), sobre todo en zonas montañosas.

Actualmente los Sistemas de Información Geográfica (SIG) facilitan el análisis de la inestabilidad de las laderas incorporando una serie de variables y grandes cantidades de datos, con la consecuente generación de mapas de susceptibilidad y peligrosidad de manera eficiente y rápida en grandes zonas de terreno. En este trabajo se pretende aplicar una metodología que contribuya en la medida de lo posible, a prevenir y reducir los daños ocasionados por los movimientos de ladera a través de la generación de mapas de susceptibilidad y peligrosidad,

partiendo de la base de inventarios, su evolución en el tiempo y la relación con los factores condicionantes y desencadenantes.

La memoria que aquí se presenta se ha estructurado en 8 capítulos, de acuerdo a las distintas etapas del estudio, las cuales en su conjunto reflejan la metodología utilizada.

Capítulo 1: Este capítulo introductorio presenta 4 apartados en los cuales se justifica la investigación realizada, se plantean los objetivos a alcanzar, para luego continuar con la descripción de la metodología seguida. El cuarto apartado describe el estado del conocimiento relacionado con los movimientos de ladera, tipos de inventarios y aplicaciones de los SIG en este tipo de estudios.

Capítulo 2: Este capítulo describe la localización geográfica donde se realiza esta investigación, tanto desde el punto de vista fisiográfico, político, socioeconómico, geológico y culmina con el análisis de la problemática que generan las inestabilidades de ladera en la región.

Capítulo 3: Este capítulo desarrolla el trabajo realizado sobre la generación de inventarios, caracterización geotécnica y dinámica de los movimientos de ladera y la generación de inventarios multitemporales; así como, la caracterización geotécnica y dinámica de 4 movimientos de ladera seleccionados con el propósito de obtener información detallada sobre las causas que los originaron.

Capítulo 4: Este capítulo aborda la generación de los mapas de susceptibilidad, partiendo para ello de la base de datos de los factores condicionantes sacados a partir de los mapas derivados de los modelos digitales del terreno y del análisis de campo. Además, se describen las metodologías aplicadas para generar el modelo de susceptibilidad con su grado de ajuste, selección de las variables condicionantes y por último el resultado del modelo de susceptibilidad obtenido.

Capítulo 5: Este capítulo describe el análisis de los factores desencadenantes, con un especial énfasis en la precipitación. Se han realizado los análisis pertinentes para alcanzar los umbrales de lluvia que desencadenan estos procesos.

Capítulo 6: En este capítulo se analiza la peligrosidad y la tasa de recurrencia de los movimientos de ladera con el objetivo de obtener inventarios multitemporales. También se describe la metodología seguida para la obtención del modelo de peligrosidad, los resultados obtenidos, así como la validación de los mismos.

Capítulo 7: En este capítulo se sintetiza y se discuten los resultados obtenidos.

Capítulo 8: En este capítulo se exponen las principales conclusiones de la investigación realizada, culminado con la propuesta de futuras líneas de investigación.

La memoria se completa con la incorporación de un apartado de “bibliografía” que incluye las referencias bibliográficas citadas en el texto. La memoria también incluye un apartado de anexos.

1.1 JUSTIFICACIÓN

El Ecuador, como país Andino, tiene un conjunto de características físicas que condicionan la aparición de las amenazas naturales, entre ellas se citan: Zona de subducción entre la placa de Nazca y la Sudamericana (una de las más activas del mundo); actividad volcánica importante con algunos volcanes activos; relieves montañosos; vertientes empinadas y de gran extensión; formaciones geológicas sensibles a la erosión; sucesión de estaciones secas y lluviosas;

precipitaciones pluviométricas abundantes y/o con intensidad elevada; ubicación ecuatorial a la orilla del océano Pacífico (eje del ENOS o El Niño), entre otros (Demoraes y D'Ercole 2001).

En las últimas décadas, el país ha estado expuesto a una serie de fenómenos de origen natural de gran magnitud y gran extensión (Tabla 1). Estos eventos fueron en ocasiones catastróficos; es decir, su carácter destructivo causó desequilibrios socioeconómicos y ambientales muy graves, que en algunos casos tuvieron consecuencias a largo plazo. Adicionalmente, la aparición de una gran cantidad de eventos menores que tuvieron impactos menos devastadores, revela la situación de un país que está casi en su mayoría expuesto a peligros naturales (Demoraes y D'Ercole 2001). En el siglo XX las pérdidas de vidas humanas debidas a eventos naturales superan las 14.000, mientras que las económicas exceden los 2.800 millones de dólares, equivalente casi al 15% del Producto Interno Bruto (PIB) en el año 1997 (CARE 2001). Sin considerar el desastre ocurrido por el terremoto del 16 de abril del 2016, cuyo costo de reconstrucción asciende a 3.343,8 millones de dólares (SENPLADES 2016).

Tabla 1. *Catástrofes acaecidas Ecuador, sectores afectados y consecuencias (Demoraes & D'Ercole, 2001 "Cartografía de riesgos y capacidades en el Ecuador" & INFORME DE SITUACION N°71-19/05/2016 SNGR).*

FECHA	TIPO DE FENOMENO	LUGAR AFECTADO	CONSECUENCIAS SOBRE LAS COMUNIDADES Y SUS ASENTAMIENTOS
1640	Derrumbamiento	Cacha	Desaparición del pueblo de Cacha, cerca de Riobamba, 500 muertos aproximadamente
1687	Terremoto	Ambato, Pelileo, Latacunga	Destrucción de Ambato, Latacunga y pueblos de la comarca. 7.200 muertos aproximadamente
1698	Terremoto	Riobamba, Ambato, Latacunga	Gran destrucción de casa e Iglesias, 7.000 muertos aproximadamente.

1768	Erupción volcánica, el Cotopaxi	Valle Interandino, Quito y Latacunga	Perdidas agrícolas (cebada, ganado), hundimiento de casas bajo el peso de la ceniza, destrucción de puentes, 10 muertos
1797	Terremoto	Riobamba	Destrucción total de la ciudad, que fue después trasladada a otro sitio, entre 13.000 y 31.000 muertos, epidemias, impacto socio-económico elevado
1877	Erupción volcánica del Cotopaxi	Valle Interandino, Quito y Latacunga	Las avenidas arrasaron casas, haciendas, factorías, puentes, y los lahares causaron la muerte de 1.000 personas aproximadamente
1896	Terremoto	Bahía de Caráquez, Portoviejo	Destrucción parcial de edificios y viviendas, un muerto y varios heridos
1923	Terremoto	Carchi	Cayeron muchas casas, daños de caminos, 3.200 muertos y 20.000 personas sin techo
1942	Terremoto	Guayaquil-Portoviejo	Pérdidas cuantiosas, cuarteamientos serios en paredes y cubiertas, 200 muertos, centenares de heridos
1949	Terremoto	Ambato y Pelileo	Ciudad íntegramente destruida, 6.000 muertos y miles de heridos, 100.000 personas sin hogar, consecuencias socioeconómicas grandes y de larga duración
1958	Terremoto	Provincia de Esmeraldas	Colapso total de casas antiguas y parcial de construcciones nuevas, destrucción de barcos de 4 a 5 muertos
1970	Terremoto	Frontera Sur (Perú)	Destrucción casi total de algunas cabeceras cantonales, impacto socioeconómico considerable, 40 muertos. Y entre Ecuador y Perú aproximadamente 1.000 muertos
1987	Terremoto	Oriente, Pichincha, Imbabura	3.500 muertos, reducción en un 60% de los ingresos por exportación (se dañó el Oleoducto transecuatoriano), cierre de vías por deslizamientos, aislamientos de pueblos
1992	El Niño (inundaciones)	Costa	Pérdidas agrícolas, 22.000 muertos, 205.000 personas afectadas, daños evaluados a 20 000 millones de dólares
1993	Deslizamiento Josefina	Río Paute, vía a Cuenca	50 muertos y 147 millones de dólares de daños directos

1997-1998	El Niño (inundaciones)	Costa	286 muertos, 30 000 damnificados, puentes destruidos, carreteras dañadas, impacto socio económico serio y a largo plazo
1998	Terremoto	Bahía de Caráquez	3 muertos, 40 heridos, 750 personas sin hogar, 150 casas destruidas, 250 casas dañadas
1999	Erupción volcánica del Guagua Pichincha	Quito - Lloa	2.000 personas desplazadas (Lloa), pérdida de ganado, perturbación del flujo aéreo, perturbación funcional de Quito (actividad escolar,...)
1999	Erupción volcánica del Tungurahua	Baños	32 muertos (por la evacuación), 25.000 evacuados, 17,6 millones de dólares de pérdidas agrícolas estimadas, y 12 millones de dólares de pérdidas en turismo
2016	Terremoto	Pedernales	663 muertos, 6.274 heridos, 28.775 personas albergadas, 6.998 edificios destruidos

Los movimientos de ladera son uno de los fenómenos naturales más predecibles y controlables, en comparación con otros análogos de carácter catastrófico como terremotos o erupciones volcánicas (Brabb 1991). Una de las principales medidas para la prevención y mitigación de las pérdidas producidas por los movimientos de ladera es la elaboración de mapas de inventario, susceptibilidad, peligrosidad y riesgo (Corominas 1987; Brabb et al. 1991; Chacón et al. 1996a; Chacón 2005; Chacón et al. 2006), que cada vez son mucho más factibles de incorporar a los planes de ordenamiento territorial.

En general, en el Ecuador y la región de Loja existen pocos estudios aplicados a la generación de metodologías y mapas de susceptibilidad y/o peligrosidad adecuados a sus condicionantes físicos. Los que hay son de carácter regional (Figura 1a) y no permiten generar mejores políticas de control y uso del territorio. En los últimos años, el estado Ecuatoriano a través del Centro de Levantamientos Integrados de Recursos Naturales por Sensores Remotos (CLIRSEN), ha elaborado el proyecto: “Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional”, en cuyo contexto se han generado mapas

de geopedología y amenazas geológicas a escala 1:25.000. En el año 2013, el Instituto de Investigaciones Geológico, Minero y Metalúrgico (INIGEMM) generó un mapa de susceptibilidad por movimientos en masa del Ecuador, escala 1:1'000.000 (Figura 1b). Estos mapas evidencian que la zona objeto de esta investigación está dentro de una zona de amenaza o susceptibilidad alta a los movimientos de ladera.

Son pocos los estudios relacionados con los riesgos asociados a los movimientos de ladera en la ciudad de Loja (Ibadango et al. 2005; Abad 2006; Guamán 2008; Soto 2010; Guamán 2012). Todos ellos son trabajos basados en la recopilación de información preexistente y han realizado el inventario de movimientos de ladera solamente sobre la base de la fointerpretación.

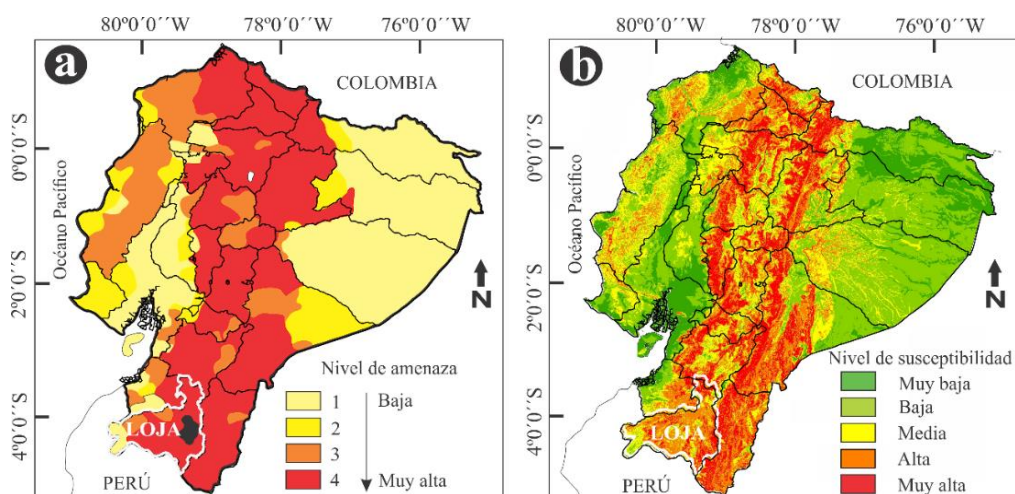


Figura 1. a) Nivel de amenazas por deslizamientos por cantón en el Ecuador (Fuente: IG-EPN-SIG AGRO-2002) b) Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa del Ecuador (Fuente: INIGEMM 2013).

Entre 1998 y 2016, se han generado gran cantidad de movimientos de ladera e inundaciones que han afectado a la población e infraestructura en varios sectores de la ciudad. Entre estos fenómenos cabe citar: los deslizamientos en la calle Berlín, colegio “Adolfo Valarezo”, colegio “27 de Febrero”, urbanización “Reinaldo Espinosa”, estación de combustible “Cooperativa de Transportes

Loja”. En los últimos años (2011 a 2016) se han generado otros, como los del barrio “La Florida” con destrucción de 14 viviendas destruidas en su totalidad; barrio “Colinas Lojanas” con 10 casas agrietadas; barrio “Chontacruz”; barrio “La Banda” con 4 casas destruidas; sector “Sierra Nevada” con una vivienda destruida y 6 muertos. Esto genera gran incertidumbre en la población ocasionando grandes pérdidas económicas y de la vida misma (Figura 2). Debido a la gran variedad de toponimios utilizados se adjunta el anexo 1.

La extraordinaria amplitud de tipologías de movimientos de ladera y de factores que controlan la peligrosidad hace que sea difícil definir una metodología única para el análisis y evaluación de la peligrosidad a los movimientos de ladera (Guzzetti 2002). Si bien es cierto que existen numerosas revisiones bibliográficas a escala regional (Carrara 1983; Brab 1984; Varnes 1984; Carrara et al. 1991 y 1995; Van Westen 1993 y 1994; Soeters y Van Westen 1996; Chung y Fabbri 1999; Guzzetti et al. 1999; Dai et al. 2002; Chacón et al. 2006; Irigaray 1995; Irigaray et al. 1999 y 2007; Jiménez-Perálvarez 2012, etc.); sin embargo, no existe un procedimiento normalizado para generar mapas de peligrosidad a escala de detalle, sino que hay diferentes enfoques y metodologías en función de las necesidades o el objetivo de la evaluación.

Por tanto, se plantea esta investigación con el objetivo fundamental de estudiar la peligrosidad de los movimientos de ladera en la cuenca de Loja (Ecuador) a escala 1:5.000, con información detallada sobre la frecuencia, tipología y dimensiones de los fenómenos de inestabilidad. La aplicabilidad de esta investigación será la de contribuir a la prevención y mitigación del riesgo asociado a estas zonas y la de poner una metodología que es aplicable a otros entornos similares. Los resultados y mapas obtenidos podrán ser utilizados por los organismos estatales correspondientes como herramienta para la toma de decisiones y planificación del desarrollo urbano de este territorio.



Figura 2. Reportes de prensa sobre los movimientos de ladera en Loja.

1.2 OBJETIVOS

En el apartado anterior se ha señalado la problemática existente en la ciudad de Loja y que está directamente relacionada con las inestabilidades de ladera. Por tanto, el riesgo asociado a estos eventos es alto, como se demuestra en los continuos daños que sufren sus habitantes. En este trabajo se pretende aplicar una metodología que contribuya en la medida de lo posible, a prevenir y reducir los daños ocasionados por estos eventos. Se plantea como objetivo principal ***“El reconocimiento de las zonas inestables, con la generación del mapa de peligrosidad frente a los movimientos de ladera a escala 1:5.000 en la cuenca de Loja-Ecuador”***, para lo cual es necesario afrontar otros objetivos específicos como:

- Generación de mapas temporales de inventario de movimientos de ladera en la zona de estudio, y consideración de parámetros relacionados con: tipología, actividad del movimiento, dimensiones, causas del movimiento y factores desencadenantes.
- Caracterización geotécnica detallada de una selección representativa de movimientos de ladera y seguimiento de su actividad, con aplicación de técnicas de instrumentación (reconocimientos de campo, fotogrametría, Geofísica, DGPS).

- Elaboración de cartografía temática de campo (mapa litológico, geomorfológico, uso de suelo, geológico.) y generada a partir del MDE para su uso como variables condicionantes.
- Elaboración de mapas a escala 1:5.000 de la susceptibilidad frente a los movimientos de ladera en la zona de estudio.
- Análisis de los factores desencadenantes (umbrales de lluvias) como activadores de movimientos de ladera.
- Obtención del mapa de peligrosidad frente a los movimientos de ladera a escala 1:5.000.
- Validación de los mapas generados para conocer su fiabilidad.

1.3 METODOLOGÍA GENERAL

La metodología general que se ha seguido para alcanzar los objetivos propuestos en esta investigación se resume a continuación (Figura 3) con una descripción general de todo el proceso seguido. Posteriormente, en el desarrollo de la misma se puntualizará específicamente la metodología aplicada a cada etapa.

1.3.1 Recopilación de información

El trabajo de investigación se inicia con la búsqueda y revisión de documentos relacionados con la temática (artículos, tesis doctorales, libros, manuales, memorias de congresos, entre otros), con el fin de facilitar el entendimiento y conocer el estado actual del conocimiento respecto a las técnicas, métodos y actividades dirigidas a la generación de la susceptibilidad y peligrosidad a los movimientos de ladera.

Además, permite visualizar las dificultades que se presentan a la hora de ejecutar dichas actividades y conocer la contribución que ofrecen las nuevas tecnologías y técnicas para la generación de información útil. Esto al final permite aprender y tomar decisiones sobre las aplicaciones de nuevas y diferentes técnicas

relacionadas a este campo. En definitiva esta actividad está presente desde el inicio hasta el final de la investigación. Mediante esta revisión ha sido posible organizar los conceptos, metodologías y resultados que se recogen en los capítulos subsiguientes.

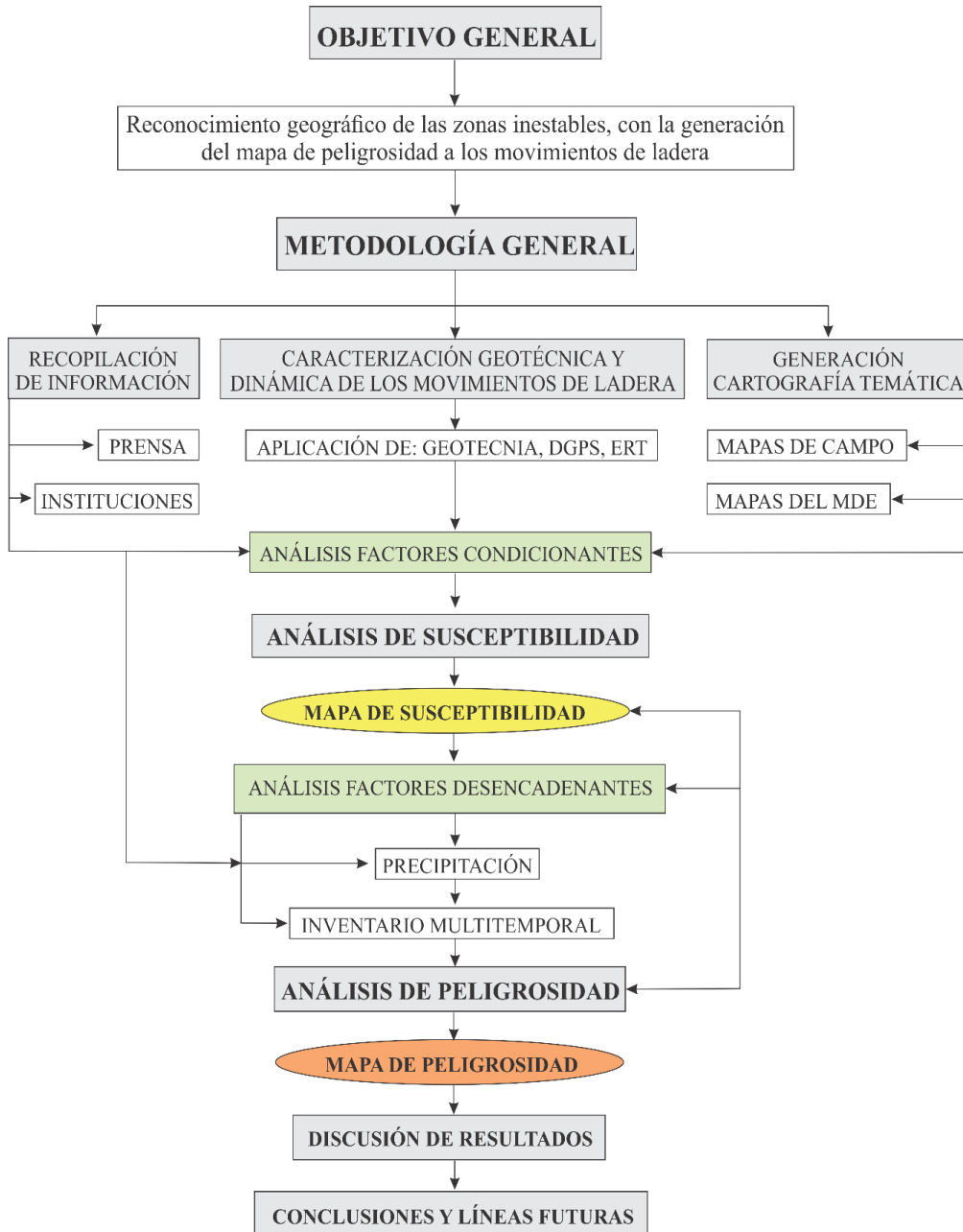


Figura 3. Procedimiento general para la realización del análisis de peligrosidad a los movimientos de ladera.

1.3.1.1 Recopilación de información de prensa

Esta actividad se realiza a fin de obtener datos sobre la ocurrencia y actividad de los movimientos de ladera en la cuenca de Loja, que permita determinar la fecha exacta de generación y posterior evolución. Sin embargo la búsqueda y revisión de documentación histórica no necesariamente aporta datos concretos, pero permite conocer textos interesantes acerca de cómo estos eventos naturales de movimientos de ladera han ocurrido en la zona.

Habitualmente, la prensa se centra más en los eventos ocurridos en zonas urbanas que ocasionan daños a la infraestructura de una ciudad e incluso en ocasiones víctimas mortales. Esto implica dejar de lado datos muy importantes como la localización geográfica exacta del movimiento de ladera. Igualmente no se suelen aportar datos sobre la cantidad de lluvia caída en ese día, o parámetros del terreno. Aún así, se trata de recoger datos de fechas para los movimientos de ladera ocurridos en la cuenca de Loja.

Esta búsqueda se centra en las noticias en la prensa escrita y digital, principalmente en el periódico "La Hora", a partir del año 2002 (Figura 4), dado que desde este año se dispone de información en la web.

Análisis de la peligrosidad frente a los movimientos de ladera en la cuenca de Loja (Ecuador)



Figura 4. Registros de prensa sobre los movimientos de ladera ocurridos en la ciudad de Loja. (Archivos de prensa digitales).

1.3.1.2 Recopilación de información institucional

A nivel institucional son muy pocas o casi ninguna las entidades, que se han dedicado a registrar información histórica relacionada con la ocurrencia de movimientos de ladera en Loja, y que proporcione parámetros decisorios para el análisis de susceptibilidad y peligrosidad a estos eventos.

A partir del año 1999, en el cual la ciudad sufrió varias afectaciones por la ocurrencia de movimientos de ladera asociados aparentemente a fuertes lluvias, algunas instituciones como la Defensa Civil, el Municipio de Loja, La Universidad Técnica Particular de Loja, empezaron a tratar de levantar información sobre los movimientos de ladera, pero de una forma muy general sin aportar parámetros técnicos y exactos. En ese mismo contexto en el año 2008 el estado ecuatoriano crea la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos del Ecuador (SNGR) con sus respectivas zonales (sucursales). Siendo ésta la Institución que se dedica a registrar este tipo de información. Por tanto, la búsqueda de información institucional se centra en la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos del Ecuador (SNGR-Zona 7), a partir del año 2010 y hasta el año 2015 (Figura 5), fecha hasta la cual se realiza este trabajo de investigación, así como en la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL).

SNGR		Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos		Zona de Atención		SNGR														
INFORME CONSOLIDADO DE EVENTOS ADVERSOS EN LOJA DE ENERO - DICIEMBRE DEL 2010																				
PROVINCIA	CANTÓN	COMUNIDAD Y/O BARRIO	FECHA	HORA	EVENTO	CONSECUENCIAS	PERSONAS AFECTADAS	PERSONAS EVACUADAS	SOCIALES AFECTADAS	EDUCACIÓN AFECTADA	INDUSTRIAS AFECTADAS	AGRICULTURA AFECTADA	ANIMALES AFECTADOS	VEHÍCULOS AFECTADOS	RECURSOS AFECTADOS	DAÑOS MATERIALES	DAÑOS AMBIENTALES	ACCIONES	NECESIDADES	
Loja	Loja	Sector Salaga	07/05/2010		Deslizamiento	40 barrios de la Ciudad estuvieron sin agua por golpes al sistema.												Agua potable	Ulimpieza.	
Loja	Loja	Sector Shucos	10/05/2010		Deslizamiento	Barrios del Sur sin agua por afectación al sistema de agua potable.												Agua potable	Municipio evacúa el material y UMARAL y Bomberos distribuyen agua.	
Loja	Loja	Ciudad de Loja	10/05/2010		Deslizamiento	Las tomas de Pizarro, San Carlos y 2 en Ajiro que alimentan a la Planta de Tratamiento Agua Potable del Pucara, con altos niveles de turbiedad.												Agua potable	Se ha reducido en un 25% el ingreso del líquido vital a los sedimentadores de UMARAL, que se encuentra ejecutando un plan de racionamiento en toda la Ciudad.	
Loja	Loja	Via Jimbilla	12/05/2010		Deslizamiento	5 barrios incomunicados: Imbará, La Libertad, La Unión, La Cheta y Tombo Blanco.												Agua potable	Intervención de maquinaria del HCTPL.	

Figura 5. Imagen del archivo con la información obtenida de la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos (Zona 7).

En lo relacionado a los datos climáticos, específicamente al historial de lluvias en la cuenca de Loja, los datos fueron aportados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI, anexo 2). No obstante, se debe indicar que en el área de estudio actualmente existen 7 estaciones meteorológicas (Figura 6), una perteneciente al INAMHI llamada Estación Meteorológica “**La Argelia**” código **M0033** colocada en los años 60, y 6 estaciones pertenecientes a la Universidad Técnica Particular de Loja colocadas recientemente en el año 2011. Sin embargo, los datos obtenidos que se aplican a la presente investigación son los de la estación meteorología “La Argelia”, debido a que representan un rango muy amplio de información referente a la precipitación diaria desde el año 1964 al 2015. Los resultados obtenidos en esta fase de recopilación de información se indican en el siguiente capítulo.

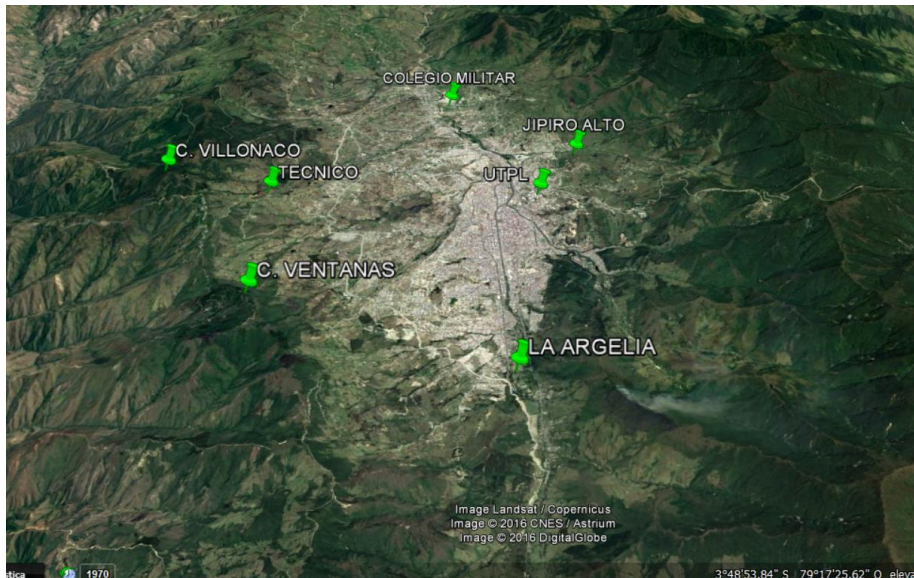


Figura 6. Localización de las estaciones meteorológicas existentes en la cuenca de Loja.

1.3.2 Generación de cartografía temática

Para esta fase de la investigación se divide en dos actividades principales: la primera la generación de cartografía temática de campo; y la segunda, la generación de cartografía temática en base al Modelo Digital del Terreno (MDT).

1.3.2.1 Cartografía temática de campo

El objetivo principal de esta fase es generar los diferentes mapas temáticos que posteriormente se utilizarán para el análisis de la susceptibilidad (mapa geomorfológico, mapa de uso del suelo, mapa geológico-estructural, mapa litológico y mapa de inventario de movimientos de ladera). Para ello se parte de un mapa topográfico y un MDT a escala 1:5.000 de la cuenca de Loja.

Mapa geomorfológico: Se elabora a partir del mapa geomorfológico realizado por Cueva (2015), en el que se aplica la siguiente metodología:

a) Recopilación de información:

- Fotografías aéreas (blanco y negro), a escala 1:30.000 impresas por el Instituto Geográfico Militar (IGM 1986).
- Ortofotos a escala 1:5.000 de la base cartográfica del Sistema Nacional de Información y Gestión de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica (SIGTIERRAS 2010).
- Mapas topográficos editados por el IGM a escala 1:50.000 correspondientes a las hojas: Loja Norte, Loja Sur, Catamayo y Nambacola (IGM 1988, 1996, 2000).
- Mapas geomorfológicos a escala 1:200.000 de PRONAREG-ORSTOM
- Mapas geológicos a escala 1:100.000 de los sectores de Loja y Gonzanamá.

b) Fase de fotointerpretación: Aquí se genera la información primaria tomando en cuenta las variables relacionadas con geología (litología, formaciones superficiales, tectónica); variables geomorfológicas (morfología, morfometría y morfodinámica); variables hidrográficas (densidad y forma de drenaje). Esta información se visualiza e interpreta a través de la observación estereoscópica.

Para la definición de las unidades ambientales, genéticas y geomorfológicas, se toma de referencia la clasificación utilizada por el “Centro de Levantamientos Integrados de Recursos Naturales por Sensores Remotos” (CLIRSEN) y Sistema Nacional de Información y Gestión de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica (SIGTIERRAS 2010) en la elaboración de la nueva cartografía geomorfológica a escala 1:25.000 en todo el país.

c) Fase de procesamiento digital: Una vez que se ha escaneado el resultado de la fotointerpretación, se procede a realizar la georreferenciación correspondiente conjuntamente con las ortofotos finales, para luego proceder a la digitalización de las diferentes geoformas con la utilización del software ArcGis 9.3. Una vez digitalizada la geoforma, se le agregan los campos correspondientes por unidad genética, unidad ambiental, pendiente, desnivel relativo, drenaje, forma de cima, longitud de vertiente y forma de valle. Posteriormente se realiza una validación, a través de trabajo de campo.

Mapa de uso del suelo: Se elabora a partir del mapa generado por Carrillo 2010. Generado sobre la base de la interpretación visual y digital de fotografías aéreas, sumado a la edición digital con el uso del software ArcGIS, versión 9.3. Con sus respectiva verificación y validación de campo, siguiendo la técnica descrita por Bocco y Riemann (1977). Posteriormente, tomando como base este mapa y la ortofoto a escala 1:5.000 (año 2010) de la base cartográfica de SIGTIERRAS (2010), se realiza una actualización de los polígonos generados considerando la expansión de nuevas urbanizaciones y la variación correspondiente en el uso del suelo hasta la fecha.

Mapa geológico-estructural: Para la generación del mapa geológico-estructural se parte del estudio “Estratigrafía y Geodinámica durante el Neógeno en el Sur de los Andes Ecuatorianos” de Hungerbühler et al. (2002), donde se realiza una descripción detallada de la estratigrafía de la Cuenca de Loja. Sin

embargo, en el mapa publicado no se definen detalladamente los contactos de cada una de las formaciones geológicas. Por ello, para la obtención de este mapa se planteó un trabajo de campo, dividiendo la cuenca de Loja en 6 posibles zonas posibles de cartografía a escala 1:5.000 a fin de delimitar contactos geológicos y datos estructurales de los mismos, para luego generar el mapa correspondiente con el uso del ArcGIS 10.1, cuyos resultados se publicaron en Tamay et al. (2016) “Nueva visión de la evolución tectónica reciente y levantamiento de los Andes al sur del Ecuador con aplicación de gravimetría y análisis estructural de las cuencas intramontañosas del Neogeno-Cuaternario”.

El trabajo cartográfico contempla actividades como:

- Campañas de campo para realizar la cartografía geológica correspondiente.
- Revisión de fotografías aéreas
- Procesamiento de datos para la generación del mapa geológico.

Mapa litológico: Tomando como base el mapa litológico generado por Soto 2010, se llevan a cabo campañas de campo, a través de recorridos que permitan identificar las diferentes características litológicas existentes y que se puedan agrupar en diferentes unidades litológicas similares. Finalmente, con el uso del ArcGIS 10.1, se editan los polígonos generados en campo y obtenerse obtiene el mapa litológico.

Mapa inventario de movimientos de ladera: Un aspecto fundamental y determinante para cualquier análisis de susceptibilidad, peligrosidad o riesgo frente a movimientos de ladera es el inventario y cartografía de éstos; porque de su calidad, dependerá, en principio el resultado final. Entre las técnicas más utilizadas están las de fotointerpretación con visión estereoscópica, análisis de imágenes LIDAR y trabajo de campo.

Para la generación del inventario de los movimientos de ladera, se utilizan dos técnicas: la **primera** en base a fotointerpretación utilizando fotografías aéreas a escala 1:7.000 del año 2003 y ortofoto a escala 1:5.000 del año 2010. La **segunda** es la cartografía de campo, actividad principal en la cual se basa esta investigación. Para lo cual, partiendo del mapa topográfico a escala 1:5.000 y el inventario generado de la fotointerpretación, se procede a realizar diferentes campañas de campo para generar la cartografía geomorfológica de los movimientos de ladera y con ello obtener los mapas multitemporales.

Es importante destacar que las fotografías aéreas al no haberse realizado expresamente con el fin de identificar movimientos de ladera, a veces no son idóneas para este trabajo por factores como escala, época del año, momento del día, etc. Sin embargo son de mucha utilidad, sobre todo a efectos de multitemporalidad.

En la cartografía de los movimientos de ladera se toma en cuenta parámetros como: ubicación, fecha de ocurrencia (si se puede obtener a través de consulta), tipología, actividad, daños ocasionados, y otros datos de interés. Existen muchos ejemplos de bases de datos diseñadas para el inventario de movimientos de ladera (Matula y Nemcok 1965; Carrara y Merenda 1976, Tamés et al. 1986; Cendrero et al. 1987a, b y c; Cooke y Doornkamp 1990; González-Díez 1995; Chacón et al. 1996). Obviamente, en función de los fines del trabajo, las bases de datos se inclinan más por unos u otros aspectos. Para este trabajo se ha preparado una ficha de recogida de datos (Figura 7, Anexo 3), basada en la propuesta por el Proyecto Multinacional Andino–Geociencias para las Comunidades Andinas (PMA:GCA 2007).

Finalmente, con la ayuda de las herramientas de edición del paquete “ArcGIS 10.1” se realizó la digitalización del inventario de movimientos de ladera, con

su respectiva “Tabla de atributos”, que permitió gestionar y analizar la información incluida, de forma que se puedan obtener los resultados deseados.

INVENTARIO DE DESLIZAMIENTOS															
ENCUESTADOR: <u>Jhona Soto</u>		FECHA: <u>15/02/2013</u>		INSTITUCION: _____		UTPL: _____		CODIGO: <u>ML-90</u>							
SECTOR: <u>15 de Agosto</u>		PROYECCION: <u>WGS-84</u>		FOTO N°: Año Escala Editor: _____		UTPL: _____		CODIGO: _____							
COORDENADAS: <u>992 430.6</u>		MAPA N°: Año Escala Editor: _____		FOTO N°: Año Escala Editor: _____		UTPL: _____		CODIGO: _____							
REFERENCIA GEOGRAFICA: <u>Varante ciudad de Loja</u>		MAPA N°: Año Escala Editor: _____		FOTO N°: Año Escala Editor: _____		UTPL: _____		CODIGO: _____							
FECHAS DE OCURRENCIA				ESTADO		ESTILO		DISTRIBUCION		DESCRIPCION		LITOLOGIA Y ESTRATIGRAFIA			
DD	MM	AA		<input type="checkbox"/> Activo	<input type="checkbox"/> Reactivado	<input type="checkbox"/> Único	<input type="checkbox"/> Retregresivo	<input type="checkbox"/> Progresivo	<input type="checkbox"/> Inclinándose	<input type="checkbox"/> Confirmando	<input type="checkbox"/> Injumbre	ESTRUCTURA	ORIENTACION	ESPACIAMIENTO (m)	
13	11	2011		<input checked="" type="checkbox"/> Latente	<input type="checkbox"/> Inestabilizado	<input checked="" type="checkbox"/> Sucesivo	<input checked="" type="checkbox"/> Retregresivo	<input checked="" type="checkbox"/> Progresivo	<input checked="" type="checkbox"/> Inclinándose	<input type="checkbox"/> Confirmando	<input type="checkbox"/> Injumbre		DB/ BZ	12 7.0 6 0.6 2 0.7 0.06 0.08	
Ultimo movimiento															
Asentamientos															
Tamaño (metros)															
TIPO DE MOVIMIENTO				MATERIAL				OTRAS CARACTERISTICAS				VELOCIDAD			
C	1	2		HUMEDAD DEL SUELO		ORIGEN DEL SUELO		MOVIMIENTO CANALIZADO		MOVIMIENTO NO CANALIZADO		ENTR. RAPIDO (>5 m/s)			
L	<input checked="" type="checkbox"/>	Caida		<input checked="" type="checkbox"/>	Seco	<input checked="" type="checkbox"/>	Residual	<input checked="" type="checkbox"/>	Movimiento canalizado	<input type="checkbox"/>	Movimiento no canalizado	<input type="checkbox"/>	Muy rapido (>3m/s)		
A	<input type="checkbox"/>	Volcamiento		<input checked="" type="checkbox"/>	Lig. Humedo	<input checked="" type="checkbox"/>	Sedentario	<input checked="" type="checkbox"/>	Movimiento no canalizado	<input type="checkbox"/>	Lacustación	<input type="checkbox"/>	Rapido (>1 km/hr)		
S	<input type="checkbox"/>	Deslizamiento rotacional		<input checked="" type="checkbox"/>	Humedo	<input checked="" type="checkbox"/>	Coluvial	<input type="checkbox"/>	Lacustación	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	Moderado (<1 km/hr)		
I	<input type="checkbox"/>	Deslizamiento traslacional		<input checked="" type="checkbox"/>	Muy humedo	<input checked="" type="checkbox"/>	Volcánico	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	Lento (<1 hora/día)		
F	<input type="checkbox"/>	Propagación lateral		<input checked="" type="checkbox"/>	Mojado	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	Muy lento (<1 hora/día)		
A	<input checked="" type="checkbox"/>	Reptación		<input checked="" type="checkbox"/>	PLASTICIDAD	Tipo de suelo sedimentario						<input type="checkbox"/>	Ent. Lento (<1 hora/día)		
C	<input type="checkbox"/>	Colapso		<input checked="" type="checkbox"/>	Alta	CUALITATIVO						<input type="checkbox"/>	Ent. Lento (<1 hora/día)		
A	<input type="checkbox"/>	Flujo		<input checked="" type="checkbox"/>	Medio	CLASIFICACION SUCS						<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	Baja	SUCS						<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	No plástico							<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
C	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								<input type="checkbox"/>			
A</															

1.3.2.2 Cartografía temática en base al MDT

Un Modelo Digital del Terreno (MDT) es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua (Felicísimo, 1994). Un tipo particular de MDT son los Modelos Digitales de Elevaciones (MDE), que constituyen la base a partir de la cual se pueden generar diversos MDT derivados (modelo digital de pendientes, de orientaciones, etc.). Un MDE se puede representar de diversas maneras, tanto en estructura raster como vectorial. Para el presente estudio se ha utilizado un MDT con una resolución de pixel de 3 m., (SIGTIERRAS, 2010). Con el cual se generan varios mapas temáticos como: mapa de elevación, de pendientes, de orientación, de curvatura, de drenaje, de Índice Topográfico de Humedad (TWI), y de Índice de Posición Topográfica (TPI), utilizando el software “ArcGIS 10.1”.

1.3.3 Caracterización geotécnica y dinámica de los movimientos de ladera

En esta fase se busca caracterizar y contextualizar los movimientos de ladera típicos, observados en la cuenca de Loja. Además, se abordó analizar en detalle cuatro movimientos de ladera activos en la cuenca de Loja, basándose en datos generados para dos trabajos de pregrado realizados (Jara 2012; Bravo 2012). Estos han sido investigados aplicando diferentes técnicas como: métodos geodésicos, geofísicos, geotécnicos y mineralógicos para proporcionar información sobre las principales características de estos, finalizando con un análisis de lluvia, el principal factor desencadenante.

La **cinemática** de estos movimientos se estudió mediante técnicas de DGPS (Sistema de Posicionamiento Global Diferencial) (Tagliavini et al. 2007; Acar et al. 2008; Acar 2010; Yin et al. 2010a; Zarate 2011; Calcaterra et al. 2012; Wang 2012; Dogan et al. 2013). La **geometría** del movimiento de ladera, planos de deslizamiento y su **estratigrafía** se obtiene a través de la realización de perfiles longitudinales y transversales de Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT), (Lapenna et al. 2003; Colangelo y Perrone 2012; Merritt et al. 2014).

Los materiales **geológicos** involucrados en los deslizamientos se caracterizaron por sus propiedades geotécnicas, prestando especial atención a la composición mineralógica de las arcillas (Yilmaz y Karacan 2002; Azañón et al. 2010; Regmi et al. 2013; Grana y Tommasi 2014). Culminando con un **análisis pluviométrico para ver la correlación con estos procesos superficiales**.

1.3.4 Análisis de la susceptibilidad

Las inestabilidades de las laderas dependen de la acción conjunta de varios factores diferentes (Cooke y Doornkamp 1974; Crozier 1984; Chacón et al. 1993; Irigaray 1995). Es decir, la inestabilidad de una ladera no se suele producir por la acción de un solo factor, sino por la conjugación de varios de ellos. Entre estos factores se puede hacer una primera clasificación entre factores condicionantes (determinantes) que controlan la actividad en el espacio y factores desencadenantes (activadores) que controlan la actividad en el tiempo (Hansen 1984; Crozier 1984, 1986). Siendo el objetivo de este apartado el análisis de la susceptibilidad del territorio frente a este tipo de inestabilidades y los factores que contribuyen tanto como determinantes como desencadenantes.

Definiéndose como susceptibilidad a los movimientos de ladera, la distribución espacial de los factores relacionados con los procesos de inestabilidad para determinar zonas de áreas propensas a movimientos de ladera sin ninguna implicación temporal (Brabb y Pampeyan 1972; Chacón et al. 2006). Muchos mapas de susceptibilidad usan un esquema de color que relaciona colores más fuertes (rojo, naranja y amarillo) con áreas inestables y marginalmente inestables y colores fríos (azul y verde) con áreas más estables (Spieker y Gori 2000, 2003a, b; Chacón et al. 2006). La susceptibilidad al deslizamiento también se ha considerado como una expresión del riesgo relativo (Einstein 1988, Hartlen y Viberg 1988), la densidad total de deslizamientos o la frecuencia probable (Evans y King 1998, Evans et al. 1997).

En este trabajo, se utilizan dos metodologías para el análisis de la susceptibilidad: el método de la “**Matriz**” mediante el uso de SIG (Irigaray 1995) validado positivamente en el entorno de la Cordillera Bética (Irigaray 1995; Fernández et al. 2000; Irigaray et al. 2007), y el método de “**Likelihood ratio**” (Chung 2006), que ha sido aplicado satisfactoriamente en diversos ámbitos de las Ciencias de la Tierra y específicamente en movimientos de ladera (Remondo 2003; Zezere et al. 2004; Lee y Talib 2005; Chung y Fabbri 2008; Carrara et al. 2008). La metodología específica de cada método se explica más adelante en el capítulo IV relacionado con el “Análisis de la susceptibilidad”.

1.3.5 Análisis de peligrosidad

Existen numerosas revisiones sobre la evaluación de la peligrosidad frente a los movimientos de ladera (Carrara 1983; Brab 1984; Varnes 1984; Carrara et al. 1991, 1995; Van Westen 1993, 1994; Soeters y Van Westen 1996; Chung y Fabbri 1999; Guzzetti et al. 1999; Dai et al. 2002; Chacón et al. 2006). La extraordinaria amplitud del espectro de los movimientos de ladera hace que sea difícil definir una metodología única para determinar la peligrosidad frente a los movimientos de ladera (Guzzetti 2002). Sin embargo, hay diferentes enfoques y metodologías en función de las necesidades (proporcionar información, asesoramiento, o establecer las normas legales), el objetivo de la evaluación (planificación regional, desarrollo local, diseño de infraestructuras), la escala de trabajo, la calidad de los datos de entrada, el tiempo y el presupuesto disponible.

Concretamente en este estudio, se analizará la peligrosidad con la finalidad de que los resultados obtenidos, puedan contribuir al desarrollo local y ordenamiento territorial de la ciudad de Loja. Para ello, se aplicarán dos criterios fundamentales para obtener la temporalidad a fin de analizar la peligrosidad: el primero es la determinación de la frecuencia de ocurrencia de movimientos de ladera en base al inventario multitemporal, y el segundo criterio es el análisis de la precipitación a fin de obtener umbrales de lluvia como posibles

desencadenantes de los movimientos de ladera. La consecución de estos parámetros específicos conducirá a la obtención del objetivo final, el mapa de peligrosidad. La descripción detallada de este proceso se explicará en el capítulo VI de esta memoria.

1.4 ESTADO DEL CONOCIMIENTO

1.4.1 Inestabilidad de los movimientos de ladera

Los procesos geológicos y climáticos que afectan a la superficie terrestre crean el relieve y definen la morfología de las laderas, que va modificándose a lo largo del tiempo para adaptarse a nuevas condiciones geológicas o climáticas. Por lo general, las laderas adoptan pendientes naturales cercanas al equilibrio; ante el cambio de condiciones, su morfología se modifica buscando de nuevo el equilibrio. En este contexto, los movimientos de ladera pueden entenderse como los reajustes del terreno para conseguir el equilibrio ante un cambio de condiciones (González de Vallejo 2004).

Han sido muchos los términos empleados por diversos autores para referirse a los estudios de la inestabilidad del terreno (movimiento de ladera, fenómenos de remoción en masa, movimientos en masa, deslizamientos, etc.). Es común encontrar en la literatura, terminología que no es consistente y definiciones ambiguas.

Para solucionar esta problemática, otros autores han sugerido, con más o menos éxito, términos como los de movimientos de ladera (“slope movement”) y movimientos de masa (“mass movement”) (Varnes 1978; Hutchinson 1968; Crozier 1986), para referirse a la globalidad del fenómeno. En relación a estos términos, Varnes (1978) indica que por movimientos de masa se pueden entender, además de los movimientos de ladera, otros como la subsidencia, los hundimientos kársticos, etc., y prefiere utilizar la palabra movimientos de

ladera. Por otro lado, el término movimientos de masa acota el concepto en cuanto a otros procesos como la erosión que se consideran movimientos de partículas (Hansen 1984).

En adelante se utilizará el término “MOVIMIENTO DE LADERA” en sentido amplio como traducción de “slope movement” (Varnes 1978) o “landslide” (Sharpe 1938), y lo definimos de forma muy simple como “el movimiento de una masa de roca, suelo o derrubios (“debris”) en una ladera en sentido descendente por acción de la gravedad (Cruden 1991).

1.4.2 Tipos de inventarios según su naturaleza y rango temporal

Palenzuela (2015), realiza una revisión sobre los tipos de inventarios e indica: “que los inventarios de movimientos de ladera se puede hacer en función de la naturaleza de sus fuentes de datos, distinguiendo entre *inventarios de archivo* cuando la información se obtiene de la literatura o documentos revisados, y los de tipo *geomorfológico*, que como indica su nombre, se refieren a la cartografía de eventos empleando las técnicas existentes para ello. A su vez, estos últimos se clasifican según su extensión temporal, como indica Guzzetti et al. (2012):

a) *Inventarios por evento*: mapas que muestran todos los movimientos de ladera provocados por un solo evento desencadenante o MORLE (terremotos, tormentas o deshielo).

b) *Inventarios estacionales*: comprenden los movimientos ocurridos durante una o varias estaciones (Fiorucci et al. 2011). Se pueden generar a partir de múltiples conjuntos de fotografías aéreas o imágenes de satélite de diferentes fechas. A estos se les data asignándoles la fecha (o periodos) de sus posibles eventos desencadenantes.

c) *Inventarios multitemporales*: incluyen movimientos que se desarrollan normalmente durante años a decenas de años (Galli et al. 2008). Como en el tipo de inventarios estacionales, se pueden generar a partir de múltiples conjuntos de fotografías aéreas o imágenes de satélite de diferentes fechas. Igualmente, a estos se les data asignándoles la fecha (o periodos) de sus posibles eventos desencadenantes.

d) *Inventarios históricos*: tienen en cuenta los efectos acumulativos de muchos eventos durante un período de decenas, centenas o miles de años. En este tipo de inventarios, la edad de los eventos no se diferencia, o se da en términos relativos (reciente, viejo o muy viejo).

La elaboración de uno u otro tipo de inventario influirá en las actividades para la evaluación de las componentes del riesgo, o las limitará en función de la extensión de sus datos. Por lo tanto, la tarea de registrar los datos históricos y recientes sobre la ocurrencia de movimientos de ladera por medio de diferentes técnicas debería ser una actividad sistemática aplicada por las instituciones competentes; sin embargo, actualmente la información y comprensión de este fenómeno están mínimamente definidas”.

1.4.3 Aplicaciones de los SIG en los estudios de movimientos de ladera

Existen varias definiciones en torno a los Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Cebrian y Mark 1986; Burrough 1986; Bracken y Webster 1990; Bosque-Sendra 1992; Irigaray 1995). De manera simple un sistema de información geográfica se puede contemplar como un conjunto de mapas de la misma porción del territorio, donde un lugar concreto tiene la misma localización en todos los mapas incluidos en el SIG (Bosque 1992). *Environmental Systems Research Institute Inc.* (ESRI 1995), los define como un conjunto organizado de hardware, software y datos geográficos, diseñados específicamente para capturar, almacenar, actualizar, manipular, analizar y mostrar todo tipo de

información referenciada geográficamente, con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión geográfica. En esencia, un SIG es una base de datos espacial, esto es, información con representación geográfica; mapas interactivos en los que se pueden realizar consultas o resolución de problemas territoriales (Jiménez-Perálvarez 2012).

Un SIG puede contener varios modelos de datos de los objetos geográficos: modelo vectorial, modelo raster, jerárquico-recursivo, etc., todos ellos válidos para los mapas planos formados por puntos, líneas y polígonos. Cada modelo está más adaptado para realizar unas determinadas tareas (Bosque 1992). También existen modelos de datos espaciales para realizar mapas tridimensionales o de volúmenes. Por ende un SIG es una herramienta perfectamente aplicable para realizar el análisis y la posterior cartografía de la susceptibilidad, peligrosidad y/o del riesgo a los movimientos de ladera. El desarrollo de los SIG ha incrementado enormemente la aplicación en este campo (Van Westen 1994).

Las primeras aplicaciones con modelos de SIG en zonificación de susceptibilidad/peligrosidad a movimientos de ladera datan de los años 70 (Brabb et al. 1972; Kienholz 1978; Newman et al. 1978; Carrara et al. 1978; Hua y Radulescu 1978; Radbruch-Hall et al. 1979; Nilsen et al. 1979). En ellos se aplicaba el análisis cualitativo, combinando factores, y el estadístico multivariante. Durante los años 80 y 90 el desarrollo comercial de los SIG en los análisis de susceptibilidad permite dar mayor aplicabilidad (p.ej. Stakenborg 1986; Crozier 1986; Brabb 1984; Brabb et al. 1989; Carrara 1983 y 1988; BernKnopf et al. 1988; Ingsbury et al. 1992; Alzate y Escobar 1992; Carrara 1990 y 1991; Chacón et al. 1992; Chung et al. 1995; Canuti y Casagli 1996; Guzzetti et al. 1996; Soeters y Van Westen 1996; Aleotti y Chowdhury 1999). Van Westen (1993) publicó un manual completo sobre la aplicación de un SIG en la zonificación de inestabilidades de ladera.

A lo largo del tiempo la gran disponibilidad de ordenadores personales y gran número de paquetes de software comerciales, favorecen un uso generalizado de los SIG para el análisis y modelado de los datos georreferenciados, y el desarrollo de aplicaciones específicas para procesos físicos como la inestabilidad de las laderas. Como lo demuestran diferentes y significantes contribuciones (Iovine et al. 2003a, b; Irigaray et al. 2003; Ayalew y Yamagishi 2005; Irigaray et al. 2006; Chacón et al. 2006; Davis et al. 2006; Costanzo et al. 2012).

La susceptibilidad frente a los movimientos de ladera expresa en forma espacial, la mayor o menor tendencia del terreno a la generación de movimientos de ladera. Es la condición general de estabilidad del terreno (Brabb et al. 1972; Chacón et al. 1993; Irigaray 1995).

Para la evaluación de la susceptibilidad y peligrosidad no hay un procedimiento universal o estandarizado, más bien existen diferentes enfoques y metodologías en función de las necesidades, el objetivo (planificación regional, el desarrollo rural o el diseño de infraestructuras), la escala de trabajo, calidad de datos, el tiempo y el presupuesto disponible (Corominas y Moya 2008). No obstante, a día de hoy existen diferentes revisiones y síntesis de las principales clasificaciones de la susceptibilidad (Van Westen et al. 1997; Van Westen 2000; Fell et al. 2005; Chacón et al. 2006; Fell et al. 2008; Nandi y Shakoor 2010; Wang et al. 2012; Feizizadeh y Blaschke 2013; Regmi et al. 2014).

Los mapas de susceptibilidad y peligrosidad a los movimientos de ladera son herramientas necesarias para la planificación y uso del territorio y de gran ayuda para los tomadores de decisiones. De acuerdo con Van Westen et al. (1997) y Van Westen (2000) en el análisis de la **susceptibilidad** a los movimientos de ladera en SIG, las diferentes metodologías se pueden diferenciar en:

1.4.3.1 Métodos cualitativos (empíricos) o llamados métodos heurísticos.

Particularmente adecuados para estudios regionales a pequeña escala. Se basan en la producción de mapas de susceptibilidad según la experiencia del científico responsable del análisis (Carrara y Merenda 1974; Stevenson 1997; Kienholz et al. 1983). El experto diferencia las zonas sensibles a los movimientos de ladera basándose en la experiencia previa de la inestabilidad de estos y la exactitud del mapa desarrollado sobre la base de este enfoque puede variar entre diferentes expertos porque el método depende principalmente de los supuestos en base a su experiencia y las reglas establecidas por el experto (Regmi et al. 2014). Este método se ha empleado en varios estudios (Fenti et al. 1979; Kienholz 1978; Ives y Messerli 1981; Rupke et al. 1988; Mora Varson 1994; Van Westen et al. 2003; Regmi et al. 2010b).

En general, los enfoques cualitativos se basan enteramente en el juicio de la persona o personas que llevan a cabo la evaluación de susceptibilidad o peligro. Los datos de entrada normalmente se derivan de la evaluación durante las visitas de campo, posiblemente apoyada por la foto-interpretación aérea (Aleotti y Chowdhury 1999). Estas metodologías, también definidas como “Enfoques de Evaluación Expertos” (Expert Evaluation Approaches) (Leroi 1996), se pueden dividir en dos tipos: el análisis geomorfológico de campo y la combinación o superposición de mapas de índice con o sin ponderación.

1.4.3.2 Modelos basados en parámetros físicos o procesos físicos para estudios de detalle, o métodos deterministas.

Consisten en análisis de estabilidad de laderas generalmente enfocados a la evaluación del factor de seguridad (Okimura y Kawatani 1986; Mulder y Van Asch 1988; Hammond et al. 1992; Pack et al. 1998). Según Regmi et al. (2014) los modelos deterministas consideran la geometría de la pendiente, las características de los materiales de la ladera y la presión generada por el agua superficial y subsuperficial en una ecuación física. Además se suele aplicar normalmente para cartografiar la

inestabilidad de una sola ladera (Chowdhury 1976, Chowdhury y Bertoldi 1977, Wu y Sidle 1995, Gokceoglu y Aksoy 1996). Es aplicable cuando las condiciones del terreno a través de un área de estudio son relativamente homogéneas, los tipos de movimientos de ladera son conocidos y simples, y los datos de la superficie así como la hidrología subsuperficial están disponibles. No es eficaz para un área donde los movimientos de ladera son complejos y causados por el efecto combinado de una serie de factores (Regmi et al. 2014).

1.4.3.3 Métodos estadísticos cuantitativos y probabilísticos, o métodos basados en el inventario de movimientos de ladera. Son adecuados para estudios regionales a media escala, y se pueden considerar como métodos empíricos más objetivos que el heurístico. Permiten una mejor comprensión de las relaciones entre los movimientos de ladera y sus factores condicionantes o determinantes (Jiménez-Perálvarez 2012). Además, garantizan menos subjetividad con respecto a los empíricos heurísticos (Ermini et al. 2005). En el análisis estadístico, la combinación de factores que condiciona los movimientos de ladera en el pasado, son determinados estadísticamente, y las predicciones cuantitativas pueden ser hechas para áreas actualmente libres de movimientos, en las cuales existen unas condiciones similares a las pasadas (Jiménez-Perálvarez 2012; Regmi et al. 2014). El método requiere una gran base de datos de movimientos de ladera para establecer relaciones precisas de estos y de los factores que los causan. Además, el enfoque requiere técnicas apropiadas de muestreo y tratamiento de movimientos de ladera basados en su tipo, actividad y ubicación en la ladera para obtener un mejor resultado (Regmi et al. 2014).

Es un método comúnmente usado para cartografiar la susceptibilidad y los riesgos a movimientos de ladera (Carrara et al. 1991; Van Westen et al. 1997; Guzzetti et al. 1999; Lee 2004; Ayalew y Yamagashi 2005; Guzzetti et al. 2005; Gorsevski et al. 2006; Regmi et al. 2010a; Dewitte et al. 2010; Pradhan et al. 2010; Sterlacchini et al. 2010; Oh y Lee 2011; Oh y Pradhan 2011; Sezer et al.

2011; Pourghasemi et al. 2012; Pradhan 2012). Los métodos estadísticos se dividen, a su vez, en bivariantes y multivariantes:

En el análisis estadístico multivariante, Este tipo de análisis evalúa la relación combinada entre una variable dependiente (distribución de movimientos de ladera) y una serie de variables independientes (factores de control de movimientos de ladera). Los factores de control son muestreados ya sea sobre unidades de una cuadrícula o unidades morfométricas de la ladera. Finalmente la matriz resultante se analiza utilizando técnicas de regresión múltiple, regresión logística, análisis discriminante, bosque aleatorio o aprendizaje activo. Cuyos resultados se pueden expresar en parámetros de probabilidad (Palenzuela 2015). Uno de los trabajos pioneros fue el de Carrara et al. (1977), continuado por otros trabajos (Carrara 1988; Carrara et al. 1992, 1995; Chung et al. 1995).

En el análisis estadístico bivariante (método indirecto), los factores determinantes de los movimientos de ladera (previamente seleccionados) son introducidos en un SIG y se cruzan con el mapa de distribución de movimientos de ladera. Para categorizar los factores determinantes, se realiza una ponderación de las clases utilizadas en cada factor seleccionado sobre la base de la densidad de los movimientos de ladera correspondientes a cada clase. Hay diferentes variedades de esta técnica, destacando: el Peso de las Evidencias “Weights of Evidence” (Bonham-Carter et al. 1988; Agterberg et al. 1989, 1993; Poli y Sterlacchini 2007), el índice de movimientos de ladera –Landslide-Index Method– (Van Westen 1993, 1994; Van Westen et al. 1997), método de la matriz (DeGraff y Romesburg 1980; Maharaj 1993; Cross 1998; Irigaray 1995; Irigaray et al. 1999, 2007; Clerici et al. 2002; Van Westen et al. 2003; Jiménez-Perálvarez et al. 2009).

Independientemente de alto número de métodos desarrollados para la evaluación de la susceptibilidad (y/o peligrosidad) a los movimientos de ladera mediante SIG (Carrara et al. 1995; Guzzetti et al. 1999; Chacón et al. 2006) estos mapas necesitan ser validados. Mediante la validación se evalúa la calidad de los mapas de susceptibilidad propuestos (Irigaray et al. 1999, 2007; Chung y Fabbri 2003; Guzzetti et al. 2006). La calidad de un mapa de susceptibilidad a los movimientos de ladera se puede determinar usando el mismo inventario de movimientos de ladera empleado para estimar la susceptibilidad, o por otro inventario no empleado en dicha estimación (Guzzetti et al. 2006; Remondo et al. 2003; Irigaray et al. 2007).

Se pueden usar 3 técnicas básicas para obtener un inventario de movimientos de ladera independiente, para validar el mapa de susceptibilidad (Remondo et al. 2003): **a)** El inventario original puede ser dividido de forma aleatoria en 2 grupos, uno para el análisis de la susceptibilidad (grupo también llamado “muestra de entrenamiento”) y otro para la validación (“muestra test o de validación”); **b)** El análisis puede ser realizado en una parte del área de estudio y la validación en otra parte (i.e. afectada por diferentes movimientos de ladera); **c)** El análisis puede ser hecho usando movimientos generados durante un cierto periodo, y la validación realizarse considerando movimientos ocurridos en periodos posteriores. Esta técnica se considera la más razonable para testar la validez de la predicción realizada (Irigaray et al. 2007) dado que se simula la situación real de intentar pronosticar el futuro con datos del pasado. Cascini (2008), señala que la literatura científica pone de manifiesto el desarrollo extensivo en las últimas décadas de la zonificación de susceptibilidad y peligrosidad a los movimientos de ladera, que hoy en día son herramientas poderosas para mejorar la planificación del uso del territorio y evitar la ocupación de áreas amenazadas, siendo la manera más eficiente y económica de reducir daños futuros y pérdida de la vida misma. La falta de procedimientos estándar restringe la aplicabilidad de estos mapas. Sin embargo, el uso de

terminología y métodos diferentes a menudo genera confusión y dificulta la comparación entre diferentes contextos geoambientales; siendo la “metodología” una cuestión relevante en la gestión del riesgo a movimientos de ladera.

En lo referente a la **peligrosidad**, Varnes et al. (1984) define la peligrosidad como la probabilidad de ocurrencia de un movimiento de ladera de una magnitud determinada, dentro de un área dada, y en un determinado período de tiempo (Varnes et al. 1984). Esta definición sigue siendo la más aceptada para el peligro natural y para mapas que representan su distribución en una región (IDNHR 1987; Einstein 1988-1997; Starosolszky y Melder 1989; Horlick-Jones et al. 1995; Murck et al. 1997). La definición incorpora los conceptos de magnitud, ubicación geográfica y recurrencia temporal. La primera se refiere a la "dimensión" o "velocidad" del deslizamiento que condiciona su comportamiento y su poder destructivo; El segundo implica la capacidad de identificar el lugar donde el fenómeno puede ocurrir y el tercero se refiere a la frecuencia temporal del evento”.

En la literatura científica existen numerosas revisiones sobre la evaluación de la peligrosidad a los movimientos de ladera a escala de cuenca (Carrara 1983; Brab 1984; Varnes 1984; Carrara et al. 1991, 1995; Van Westen 1993, 1994; Soeters y Van Westen 1996; Chung y Fabbri 1999; Guzzetti et al. 1999; Dai et al. 2002; Chacón et al. 2006). Sin embargo, no existe un procedimiento normalizado para generar mapas de peligrosidad, más bien el enfoque metodológico está en función de la necesidad: a) Proporcionar información, asesoramiento, o establecer normas legales b) Si el objetivo es la evaluación (planificación regional, desarrollo local, diseño de infraestructuras) c) escala de trabajo d) Calidad de los datos de entrada e) Tiempo f) Presupuesto disponible. La extraordinaria amplitud del espectro de los movimientos de ladera hace que sea

difícil definir una metodología única para determinar la peligrosidad frente a los movimientos de ladera (Guzzetti 2002).

Las técnicas para la zonificación de la peligrosidad frente a los movimientos de ladera, se pueden dividir en dos grupos (Hansen 1984; Van Westen 1993): 1) Mapas de peligrosidad directos, donde el grado de peligrosidad se determina por la cartografía geomorfológica, basada en la experiencia y conocimiento del geomorfólogo respecto a las condiciones del terreno. 2) Mapas de peligrosidad indirectos, donde para predecir las zonas propensas a los movimientos de ladera se usan modelos estadísticos o deterministas, en función de la información obtenida mediante la correlación entre los factores determinantes y la distribución de movimientos de ladera. Aleotti y Chowdhury (1999) indican que los métodos de evaluación de peligrosidad a los movimientos de ladera pueden ser cualitativos o cuantitativos (Figura 8). La clasificación detallada de las metodologías de evaluación es algo subjetiva y depende de la elección de los aspectos a enfatizar.

El empleo de técnicas históricas basadas en datos directos o fotos aéreas en la evaluación de periodos de retorno, ha sido objeto de diversas contribuciones (Flageollet 1996; Dikau y Schrott 1999; Cardinali 2002; Carrara et al. 2003; Remondo et al. 2003). Entre los mapas de peligrosidad publicados, se pueden diferenciar dos tipos: a) Mapas basados en series temporales o eventos singulares de movimientos de ladera en función de la cantidad de lluvia; b) Mapas basados en el análisis de terremotos de magnitud y período de retorno conocidos según los movimientos de ladera desencadenados. Los primeros se han abordado desde diferentes perspectivas, y cabe citar aquellos obtenidos a partir de mapas de densidad de movimientos de ladera (Coe et al. 2004), a partir de mapas de susceptibilidad (Irigaray et al. 2000; Carrasco et al. 2003; Corominas et al. 2003; Remondo et al. 2004) o bien a partir de modelos físicos

o estadísticos (Carrara et al. 1991; Terlien et al. 1995; Terlien 1997; Frattini et al. 2004; Xie et al. 2004).

Por tanto, el establecimiento de la probabilidad de ocurrencia de los movimientos durante un período establecido, por lo general, se obtiene de los catálogos de los eventos de movimientos históricos (Guzzetti et al. 2005). Así se puede establecer una frecuencia de recurrencia de generación de movimientos y estimar su actividad (WP/WLI 1993a, 1995).

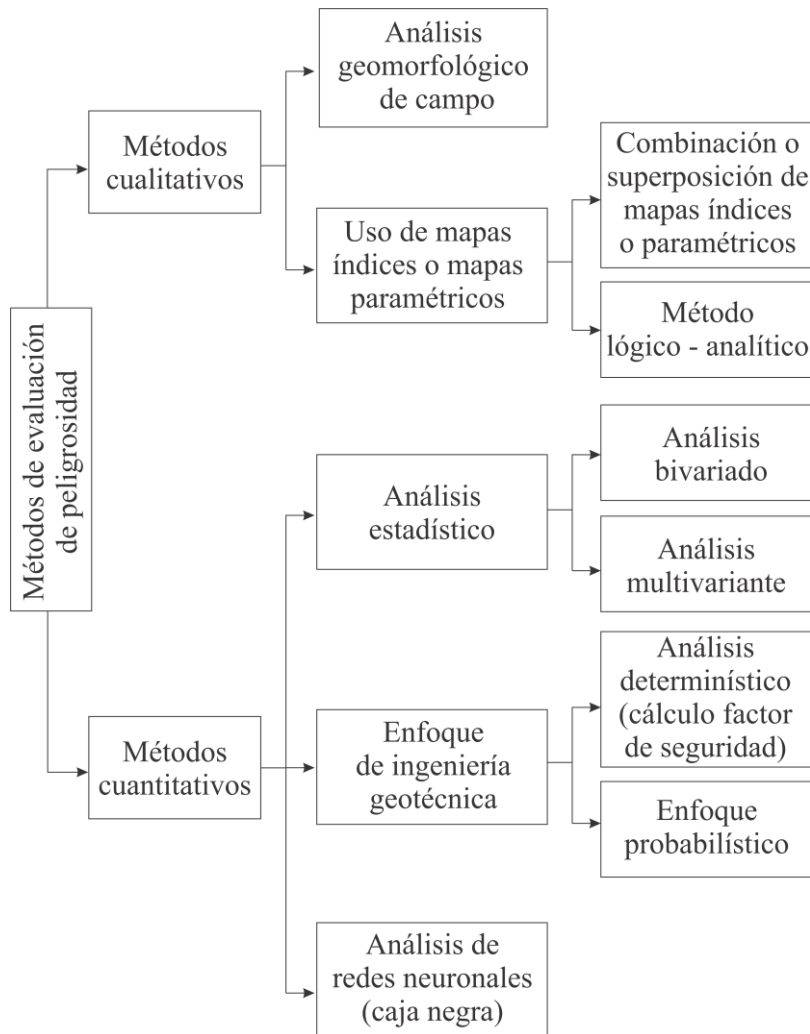


Figura 8. Clasificación propuesta de los métodos de evaluación de peligrosidad por movimientos de ladera (Aleoti y Chowdhury (1999).

CAPÍTULO II

CARACTERÍSTICAS FÍSICO GEOGRÁFICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

2.1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

Ecuador está situado al noroeste de Sudamérica, entre 1° 30' de Latitud Norte y 5° de Latitud Sur, con una superficie de 283.561 km², su territorio continental está constituido por tres regiones: La región litoral (Costa), región andina (Sierra) y región amazónica (Oriente); además de la región insular que corresponde a las islas Galápagos (Figura 9a).

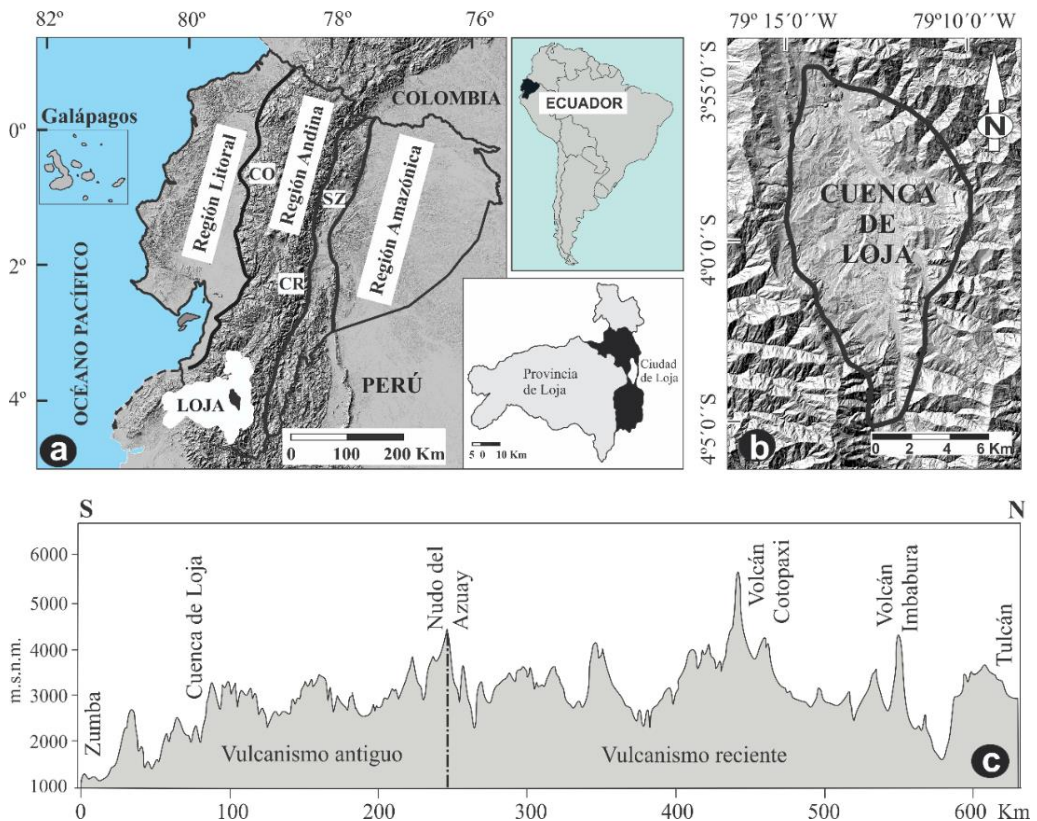


Figura 9. Ubicación del área de estudio a) Respecto al Ecuador y la provincia de Loja b) Área de estudio c) Perfil longitudinal (S-N) de la cordillera de los Andes en Ecuador.

La región andina formada por la cordillera de los Andes y dispuesta de norte a sur, está constituida por la cordillera occidental, cordillera Real de los Andes y la zona subandina. Se caracteriza por sus grandes elevaciones montañosas y volcanes. Ocupa una franja desde el límite con Colombia por el norte (Tulcán)

hasta el límite con el Perú al sur (Zumba) de 630 Km de longitud por 100 a 400 Km de ancho, con una altura promedio de 4.000 msnm. Las cordilleras se unen mediante cadenas montañosas conocidas como nudos entre las que se encuentran las hoyas, depresiones o valles; en los cuales se asientan las poblaciones de la sierra. El nudo del Azuay es el que divide a la cordillera de los Andes en volcanismo actual hacia el norte y volcanismo antiguo hacia el sur (Figura 9c).

La cuenca de Loja corresponde a la ciudad del mismo nombre, es la capital de la provincia de Loja y se encuentra ubicada al sur del Ecuador en los paralelos 3°50' y 5° de Latitud Sur, el área de estudio comprende 10.794 hectáreas (Figura 9b).

2.2 RASGOS FISIAGRÁFICOS, RELIEVE E HIDROLOGÍA

Las estructuras geológicas y materiales que constituyen la cuenca de Loja han controlado el paisaje del valle de Loja, anómalamente alto, de forma elongada en sentido N-S y de aproximadamente 14 km de ancho, medidos como la distancia entre las cordilleras. La cordillera Oriental de los Andes flanquea el valle hacia el este, y contiene picos que alcanzan más de 3.200 msnm así como valles abruptos y estrechos. Al oeste, el valle está delimitado por el cerro “El Villonaco” de 2.667 msnm, que forma parte de la cadena montañosa real de los Andes (Figura 10).

Las cordilleras mencionadas, están formadas por rocas metamórficas paleozoicas elevadas por procesos orogénicos (Hungerbühler et al. 2002). El fondo del valle, con una elevación de aproximadamente 2.100 msnm y 7 km de ancho, contiene un paisaje de colinas bajas que está dominado por relieves topográficos tipo cuesta. Este paisaje está condicionado por capas de sedimentos ligeramente inclinadas y plegadas que rellenan la cuenca de Loja. La parte

noroeste de la zona está cubierta por depósitos coluviales, que se denomina localmente "denudativo". Este depósito se derivó de la erosión de las rocas metamórficas en las partes altas, pero su origen es controvertido. A pesar de que Loja está en las cabeceras de los ríos Zamora y Malacatos, estos cursos de agua han desarrollado una llanura aluvial, de menos de un kilómetro de ancho, en el fondo del valle. Esta llanura está amenazada por inundaciones recurrentes, que afectan regularmente a algunas áreas de la ciudad durante eventos de lluvia intensa.

El sistema hidrográfico de la cuenca de Loja es de tipo dendrítico, está drenado principalmente por los ríos Zamora y Malacatos que fluyen hacia el Norte con gradientes de 3 a 6°, y una red secundaria compuesta por los ríos Jipiro, San Cayetano, Zamora Huayco, Mendieta y Minas (Figura 10). Sus aguas descienden por el Este, a la cuenca Amazónica para desembocar en el océano Atlántico.

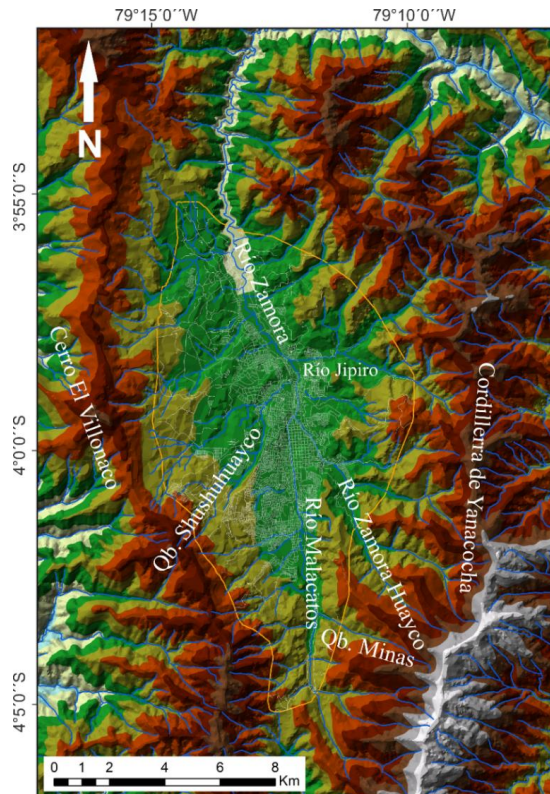


Figura 10. Red hídrica principal de la cuenca de Loja.

2.3 CLIMA Y VEGETACIÓN

El clima de la ciudad de Loja se ubica en el área del clima Templado-Ecuatorial subhúmedo, sin estación seca (según la clasificación climática de

Koppen), puesto que se asienta en la cuenca alta del río Zamora, influenciado por el clima tipo amazónico y los vientos alisios (vientos provenientes del océano Pacífico y que atraviesan el desierto peruano). Su temperatura fluctúa entre los 14°C y 24°C similar al resto de la Serranía del país, con un media de 16°C (GEOLOJA 2007) (Tabla 2).

Tabla 2. Distribución de la temperatura media en la ciudad de Loja. (GEOLOJA 2007).

Temp. °C	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Media
Med. 40 años	15.9	16	16.1	16.3	16.1	15.5	14.9	15	16	16.3	16.4	16.3	15.9
Máx. Abs.	24.9	24.7	24.6	24.7	24.8	23.7	23.1	24	25	25.9	26	25.8	24.8
Min. Abs.	8	8.9	8.6	8.7	8	7.8	7.1	6.8	6.7	6.6	5.1	6.3	7.4

Las precipitaciones ocurren durante todo el año con un promedio mensual de 74,6 mm y un promedio anual aproximado de 917 mm. Una estación con menores lluvias se produce entre mayo y septiembre, mientras que en los meses de diciembre a abril se presenta una temporada de lluvias intensas (Figura 11).

La vegetación en la hoya de Loja básicamente se encuentra representada por dos tipos que son característicos de acuerdo a la ubicación en la que se encuentran: el uno como bosque de montaña baja, constituido por cerros colinas y nudos en los que se encuentran plantaciones de aliso, pino, eucalipto y romerillo principalmente; de igual forma se observa vegetación silvestre típica de la zona como chamana y chilca. El otro tipo de vegetación baja constituido por valles y llanuras en las que se encuentran principalmente cultivos de hortalizas, cereales, frutales y árboles ornamentales.

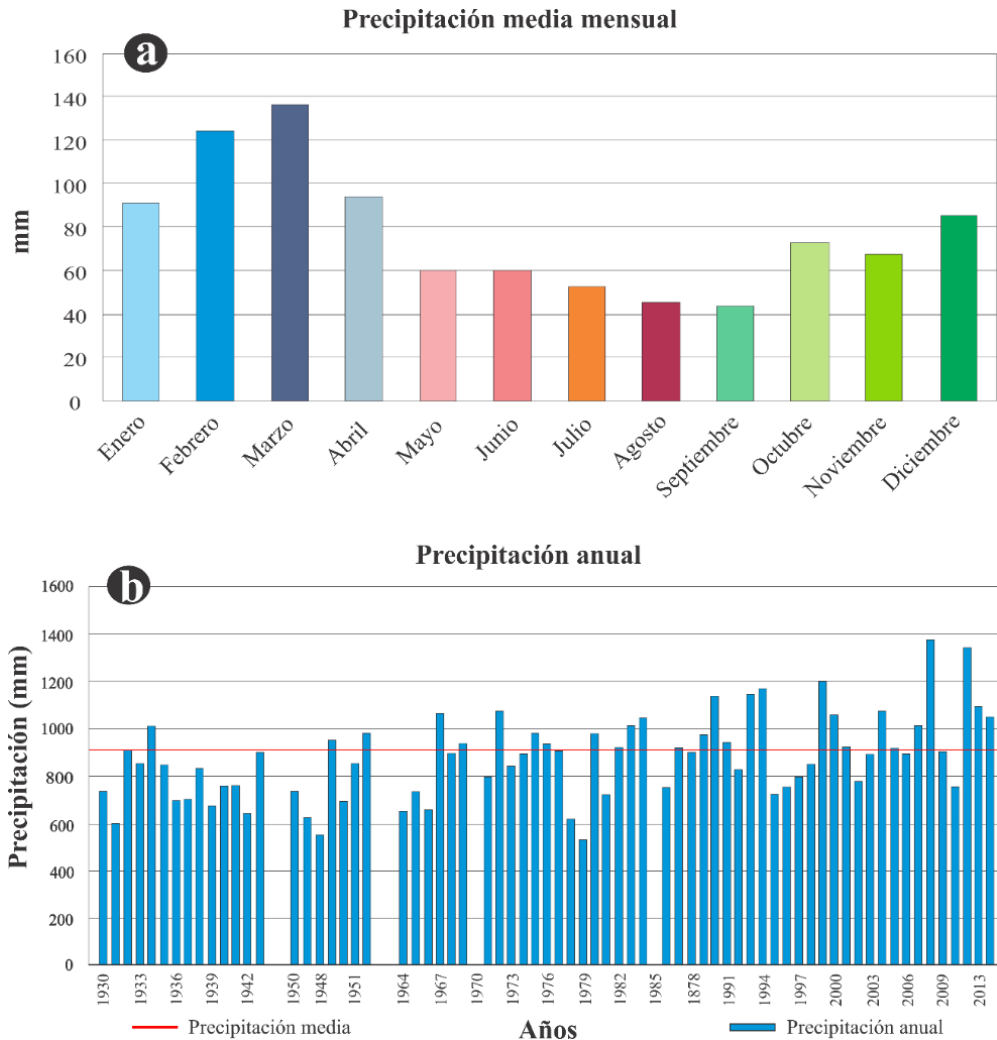


Figura 11. a) Precipitación mensual años considerando los años 1964 a 2015 b) Precipitación anual considerada desde el año 1930 hasta el 2015 (Fuente: Datos proporcionados por el INAMHI, Estación meteorológica LA ARGELIA).

2.4 CONTEXTO SOCIOECONÓMICO

La ciudad de Loja fue fundada en dos ocasiones: la primera en 1546 y la segunda, y definitiva el 8 de diciembre de 1548 por el capitán Alonso de Mercadillo, con el nombre de “**Inmaculada Concepción de Loja**”. El origen del nombre se debe a que su colonizador fue nativo de la localidad española de Loja. El cantón de Loja se conforma de 13 parroquias rurales y 6 parroquias urbanas (Figura 12), tiene un área aproximada de 1.928 Km² y una población de

214.900 habitantes. El 79,3 % de su población corresponde a la zona rural y el 20,7 % a la zona urbana. La población de la ciudad de Loja es aproximadamente de 170.280 habitantes (INEC 2010).

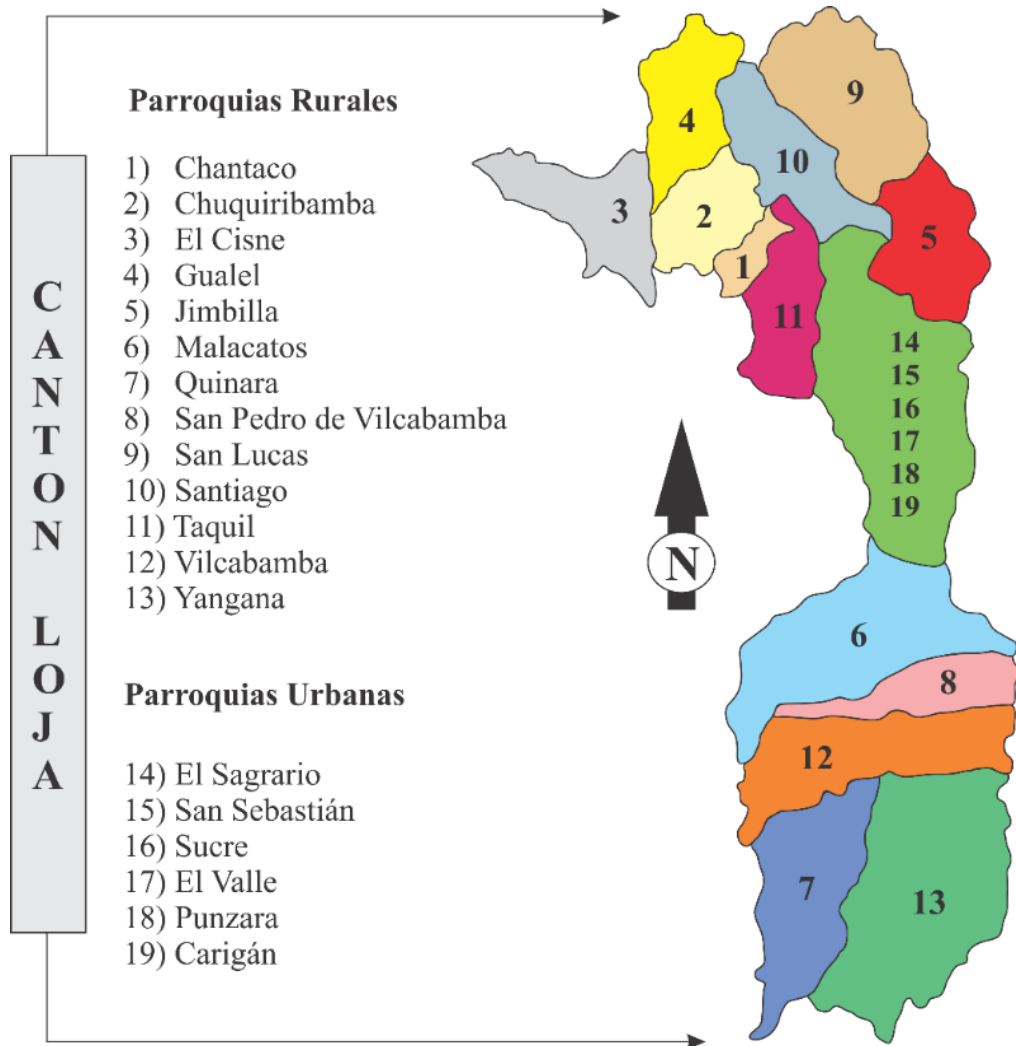


Figura 12. División política del cantón Loja.

Las actividades que mayormente desarrolla la población ocupada son: comercio al por mayor y menor; agricultura y ganadería; construcción; enseñanza (Figura 13). La pobreza del cantón por necesidades básicas insatisfechas (NBI) es del 33,7 % respecto de la provincia de Loja. La Tabla 3, indica la distribución de la educación primaria, secundaria, y universitaria de la ciudad de Loja.

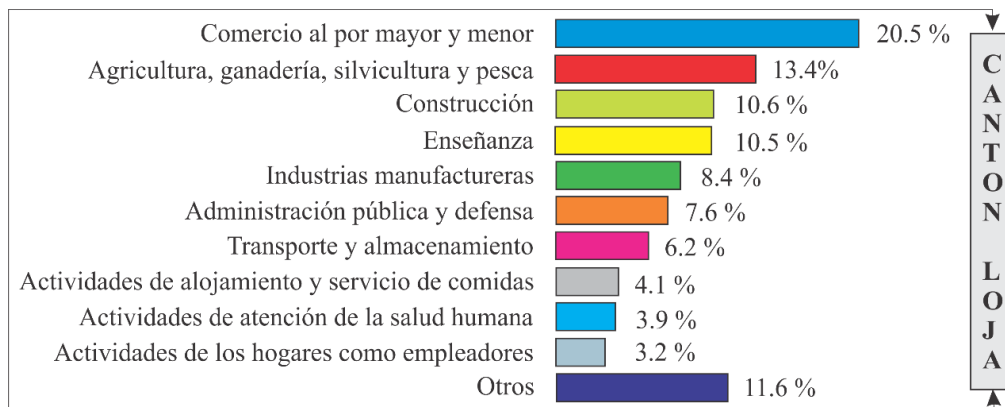


Figura 13. Población ocupada por rama de actividad en el cantón Loja (Fuente: INEC 2010).

Tabla 3. Distribución de la educación en la ciudad de Loja (Plan Cantonal 2008)

EDUCACIÓN				
NIVEL PRIMARIO Y SECUNDARIO			NIVEL UNIVERSITARIO	
TIPO DE EDUC.	No. Centros	% Estudiantes	PRIVADO	ESTATAL
Privada	85	18	Universidad Técnica Particular de Loja	Universidad Nacional de Loja
Municipales	18	6	Universidad Internacional del Ecuador	
Fiscal y Fisco-misional	185	66		

En lo referente a los recursos naturales no renovables en el cantón, resaltan los yacimientos no metálicos de arcillas, caolín, yeso, carbón y los materiales de construcción (piedra, grava y arena) que se extraen actualmente de forma artesanal. Respecto a los minerales metálicos se extrae oro de forma artesanal. Cuenta también con una gran riqueza en aguas minerales, 17 vertientes distribuidas en diferentes lugares, con características minerales diversas (SENPLADES 2010).

2.5 CONTEXTO GEOLÓGICO

La cuenca de Loja corresponde a las cuencas Neógenas del sur de Ecuador (Figura 14a). Geológicamente es una cuenca sedimentaria de origen lacustre de edad miocénica pliocénica, con un espesor de hasta 1.200 m (Tamay et al. 2016) rellena sobre un basamento de rocas metamórficas tipo: cuarcitas impuras de grano fino a medio, filitas negras, pizarras y esquistos (algunos grafíticos), de edad paleozoica (Figura 14b). Todo el periodo Neógeno, incluso los depósitos cuaternarios más recientes de este valle han sido afectados por movimientos de compresión, que han originado levantamientos o hundimientos. Así, han aparecido pliegues suaves en el lado occidental de la hoya y más estrechos y con pronunciada pendiente en la parte oriental asociados a fallas inversas con vergencia este y fallas locales normales en el borde suroeste. (Hungerbühler et al. 2002; Tamay et al. 2015).

Las diferentes litologías que constituyen la secuencia sedimentaria, describiendo de muro a techo (Hungerbühler et al. 2002) corresponden a: arenisca de grano grueso con láminas finas de conglomerados y capas menores de limolitas, agrupadas en la **formación Trigal** de origen fluvial; aflorando al NW. Calizas masivas, láminas finas de lutitas carbonatadas, capas de cherts (sílices) y areniscas amarillas de un granulado fino, de la **formación La Banda**, de origen lacustre, está presente al NW. Capas de areniscas gruesas y finas con lentes interestratificadas de conglomerados, y en menor cantidad capas de lutitas, constituyen la **formación Belén**, con ambiente mixto fluvio-deltaico; aflora al NW. Areniscas de grano fino, lutitas calcáreas (margas) y silíceas, diatomitas, carbón tipo lignito e intercalaciones de conglomerados; corresponden a la formación **San Cayetano** de origen lacustre; presente solo al E de la cuenca. Conglomerados con soporte de clastos y lentes de arenisca, de ambiente tipo abanico aluvial, presentes al E y al W de la **formación Quillollaco**, de origen fluvial. Tobas líticas fuertemente alteradas y

transformadas en caolinita, de la **formación Salapa**, de origen piroclásticos (volcánico) afloran de forma muy dispersa en el NW.

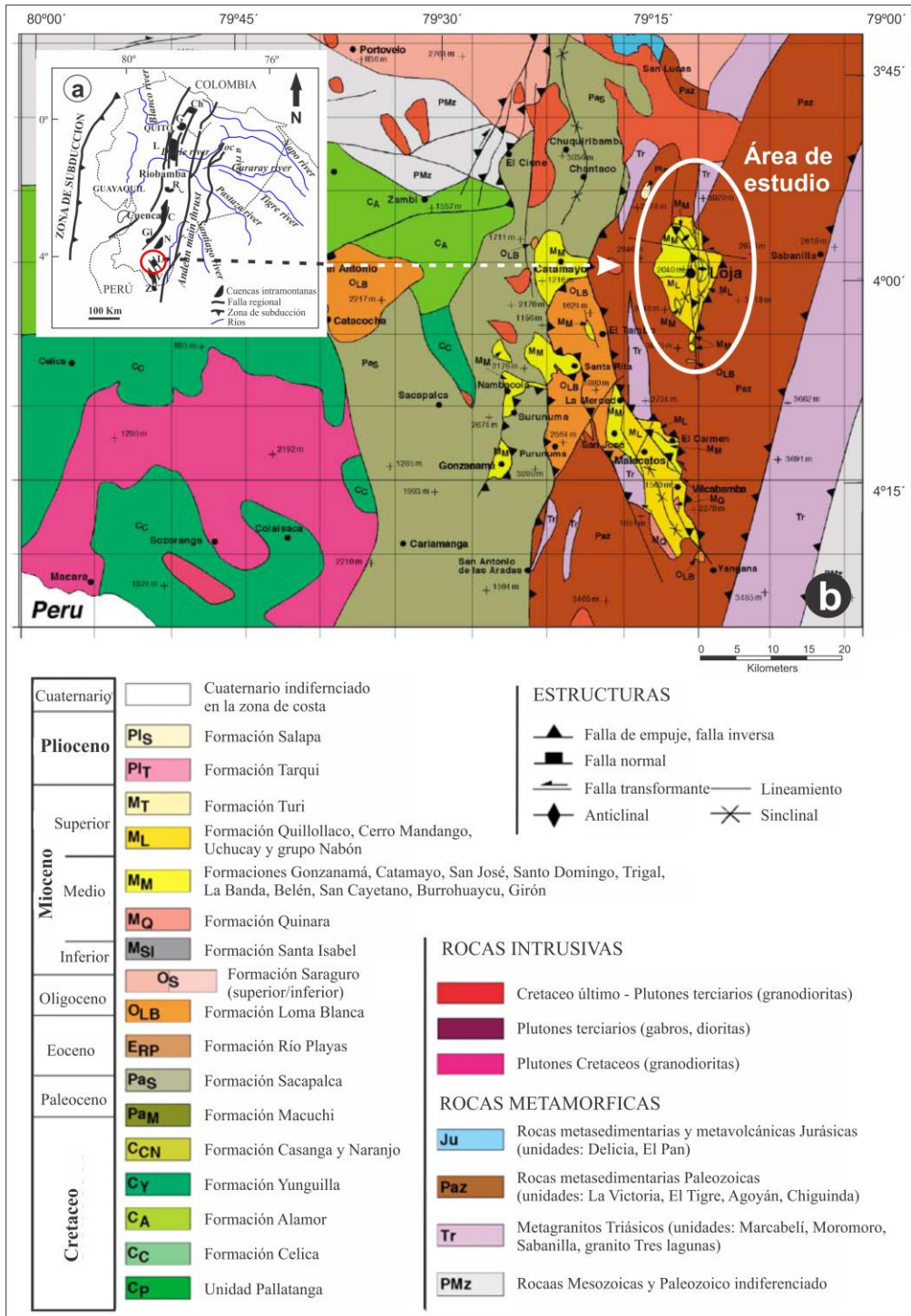


Figura 14. a) Localización de las cuencas neógenas intramontañosas del Ecuador (Fuente: Marocco et al. 1994) b) Geología regional del sur del Ecuador (Hungerbühler et al. 2002)

2.6 PROBLEMÁTICA DE LOS MOVIMIENTOS DE LADERA EN EL CONTEXTO REGIONAL Y LOCAL

Los movimientos de ladera ocurren frecuentemente como consecuencia de lluvias intensas (Varnes 1984). Estos procesos geomorfológicos generan situaciones de riesgo e incluso catástrofes de similar magnitud que los derivados de otros fenómenos naturales. El potencial destructivo de este fenómeno aumenta con el desarrollo urbanístico en áreas proclives a movimientos de ladera (Aleotti y Chowdhury 1999; Guzzetti et al. 1999). Así, el daño debido a los movimientos de ladera en términos de pérdidas humanas y monetarias está creciendo como causa del crecimiento urbano observado en ciudades localizadas en áreas montañosas. Esta tendencia es evidente a partir de los datos que se recogen en la literatura relacionada con movimientos de ladera (Unesco 1973-79; Arnould y Frey 1977; Schuster and Krizek 1978; Aleotti y Chowdhury 1999; Guzzetti et al. 1999; Irigaray et al. 2000; Cardinali et al. 2002; McBean and Henstra 2003; Haque y Burton 2005; O'Hare y Rivas 2005; Petley et al. 2005; Larsen 2008; Lacasse y Nadim 2009; Petley 2012; Palenzuela et al. 2016).

Actualmente, los países desarrollados y los que se encuentran en desarrollo tienen que realizar inversiones económicas muy elevadas para cubrir los daños generados por estos eventos; así como el lograr construir obras de estabilización de laderas. Esta situación global ha conducido a una estrategia en la que la prevención apoyada por modelos de riesgo, los sistemas de alerta temprana o la planificación del uso del suelo constituye la forma más adecuada para minimizar las pérdidas humanas y económicas debidas a movimientos de ladera (Aleotti y Chowdhury 1999; Chacón et al. 2006). Esto implica la estimación de la probabilidad de ocurrencia de los movimientos de ladera dentro de un área y periodo de tiempo determinados para la planificación.

En la región Andina los movimientos de ladera constituyen una de las mayores amenazas naturales a la que se enfrenta la comunidad (Hermans 2012). Los casos que se presentan en la figura 15 y tabla 4, reflejan las condiciones que caracterizan a la región Andina. Puede decirse que en ella se presentan todo tipo de movimientos en masa variando en intensidad, frecuencia y magnitud, de acuerdo a la combinación de los distintos factores condicionantes y desencadenantes que intervienen (PMA 2007).

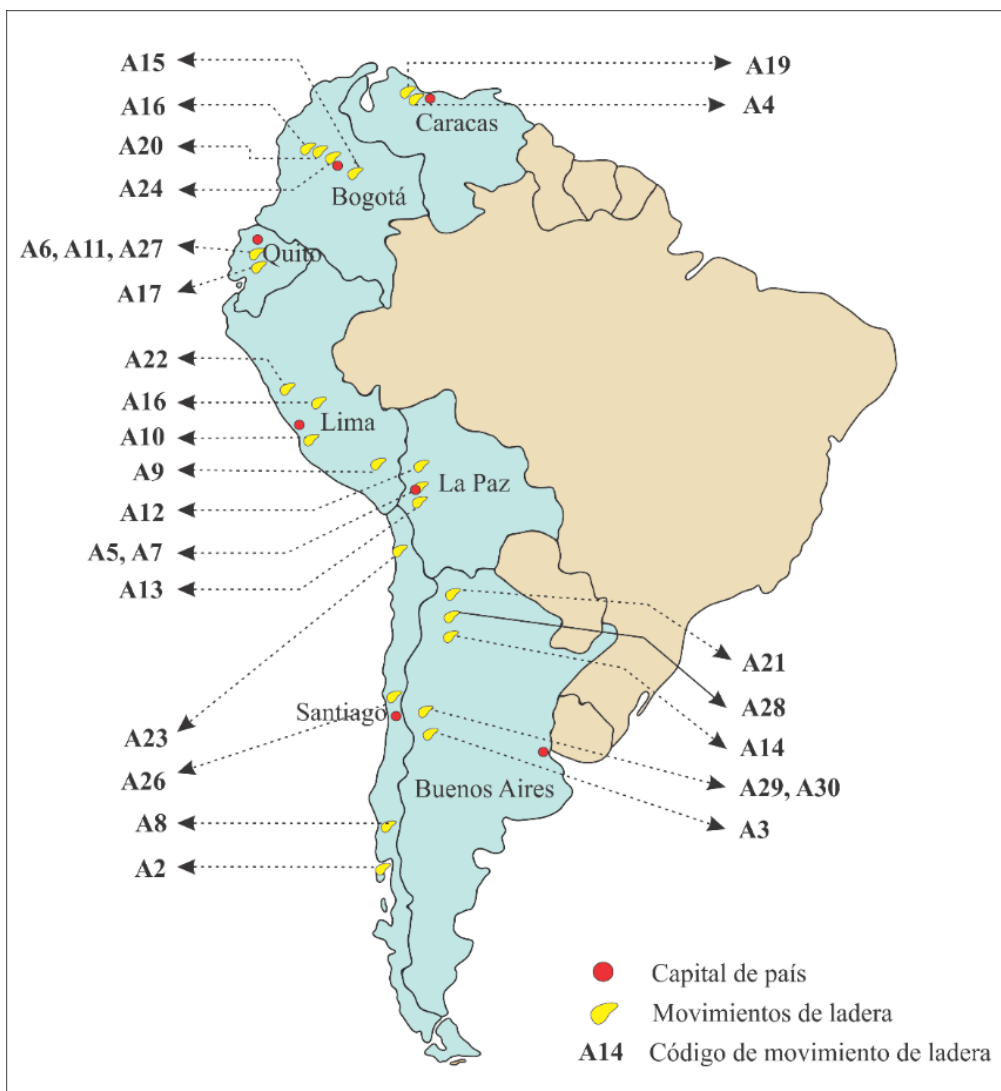


Figura 15. Localización de eventos significativos de movimientos de ladera ocurridos en Sudamérica (Fuente: PMA: GCA 2007).

Tabla 4. Características de los movimientos de ladera publicados en la región Andina (PMA: GCA 2007). Dz: deslizamiento, R: rotacional, T: traslacional, F: flujo; EF: flujo de tierra, DF: flujo de detritos, Cm: complejo, Coll: coluvial, GP: Gravas, CL: arcillas, ML: limos, SM: arenas, DVM: depósitos volcano sedimentarios, Met: metamórfico, Cog: conglomerado, V: volcánicos, DG: deformación gravitacional.

ID	Casos	Tipología	Pais	Litología	Prof. (m)	Detonante	Daños
A2	El litoral de Huicha, isla de Chiloé	CR	Chile	Sed. Mar., SM	n/a	Tormentas, sismos.	Ninguno
A3	Puente del Inca, ruta nacional No. 7 Mendoza	CR	Argentina	V	n/a	Precipitación, sismicidad	Ninguno
A4	Autopista Caracas-La Guaira	Dz	Venezuela	Coll.	s/d	Sismos	Puente desplazado
A5	San Isidro en la ciudad de La Paz	R	Bolivia	Gravas, Coll.	25	Fugas de agua y agua subterránea	Viviendas afectadas, tuberías de agua y alcantarillado
A6	Paccha-Achupallas (Chimborazo)	R	Ecuador	DVM	9	Infiltración de agua canal de riego	Viviendas afectadas
A7	Cuarto Centenario, La Paz	R	Bolivia	GP, CL, ML, SM.	55	Precipitación, fugas de agua y corte talud	Viviendas y vías
A8	Río San Pedro, Los Lagos	R	Chile	CL/Met.	80	Sismos	Represamiento de río
A9	Huamancharpa (Cusco)	T	Perú	SM, Shales	s/d	Precipitación	Ninguno
A10	Mayunmarca	T/F	Perú	SM, Shales, Cog, /Met.	150	Infiltración de agua	600 muertos, viviendas y vías
A11	Guasuntos, Alausí, Chimborazo	R	Ecuador	Coll. Volcánicos	s/d	Infiltración de aguas lluvia, fugas de agua	6 vidas humanas, viviendas, vía panamericana.
A12	Cerro Pucaloma (La Paz)	T	Bolivia	Cog, /Met.	s/d	Precipitación y labores mineras	69 muertos, 300 viviendas
A13	Valle de Allpcoma (La Paz)	T	Bolivia	CL, ML, SM.	110	Litología y pendiente	Represamiento de río
A14	Ravine de la Troya (La Rioja)	T	Argentina	SM, Shales	6	Precipitación, sismos	s/d
A15	El mirador Km 105 carretera Bogotá-Villavicencio	Dz	Colombia	Detritos	30	Precipitación	Carreteras (2700'000.000 dólares)
A16	Auyos y Asia (Pataz)	Cm/F	Perú	Coll/Cog. SM	s/d	Infiltración de agua	roads
A17	La Josefina (Azuay)	F	Ecuador	Cog. SM/Met.	80	Precipitación, excavación base de talud	Viviendas, cultivos, vías, central termoeléctrica, línea ferrocarril
A18	Villatina (Medellín)	EF	Colombia	CL, ML	6	Precipitación, acequia en la corona	450 muertos, viviendas
A19	River Limón (Maracay, Aragua)	F	Venezuela	Detritos, Coll.	1.5	Precipitación	muertos, 1500 viviendas, vehiculos, 3 puentes
A20	San Carlos (Antoquia)	M	Colombia	CL, ML, SM.	s/d	Precipitación	20 muertos, 27 viviendas, vías
A21	Palma Sola, Jujuy	DF	Argentina	Coll/SM/ML	5	Intensas lluvias	Vías y cultivos
A22	Tambo de Viso, Lima	DF	Perú	Calizas y margas	s/d	Precipitación	vías, línea férrea. 2 puentes
A23	Antofagasta	DF	Chile	Aluviales	s/d	Precipitación	91 muertos, 19 desaparecidos, 700 viviendas
A24	San Cayetano (Cundinamarca)	EF	Colombia	Coll/Shales, ML, SM.	s/d	Precipitación	Viviendas, 180 familias evacuadas
A25	Aobamba, Cusco	C/F	Perú	RM	s/d	Altas precipitaciones y deshielo	3 muertos, viviendas, cultivos, línea férrea, central hidroeléctrica (90 millones de dólares)
A26	Valle del Aconcagua	EF	Chile	Detritos, Coll.	s/d	Precipitaciones intensas	Carrera principal
A27	Las Moras, Alausí, Chimborazo	DF	Ecuador	Coll.	30	Precipitaciones intensas	Carrera principal y línea férrea
A28	Campo del Arenal, Catamarca	DF	Argentina	RM fracturadas	s/d	Sismos	Sin reportar
A29	Las cuevas, Valle del río Cuevas, Mendoza	DF/Cm	Argentina	Det./calizas	50	descongelamientos	Sin reportar
A30	Mendoza	DG/EF	Argentina	Volcanitas.	10	Descongelamientos y sismicidad	Sin reportar

En **Ecuador**, los movimientos de ladera constituyen el riesgo natural con un impacto más extendido. El Instituto de Investigaciones Geológico Mineras y Metalúrgicas (INIGEMM 2013) señala que en Ecuador se han inventariado 3.518 movimientos de ladera, de los cuales 3.286 (93,4%) son deslizamientos, 178 grietas, 54 hundimientos. De estos, el 80% se concentra en la región Sierra o Interandina (Figura 16a). Eras (2014), indica que entre el año 1970 y 2013 en Ecuador tuvieron lugar 3.113 movimientos de ladera (Figura 16b). Estos ocurrieron principalmente durante los meses más húmedos: enero, febrero, marzo y abril (Figura 16c) y las provincias con mayor presencia de movimientos de ladera son: Loja (24%), Cañar (16%), Azuay (11%), Chimborazo (10%) e Imbabura (9%), entre otras. El 20% restante se localizan en la región Costa y Oriente.

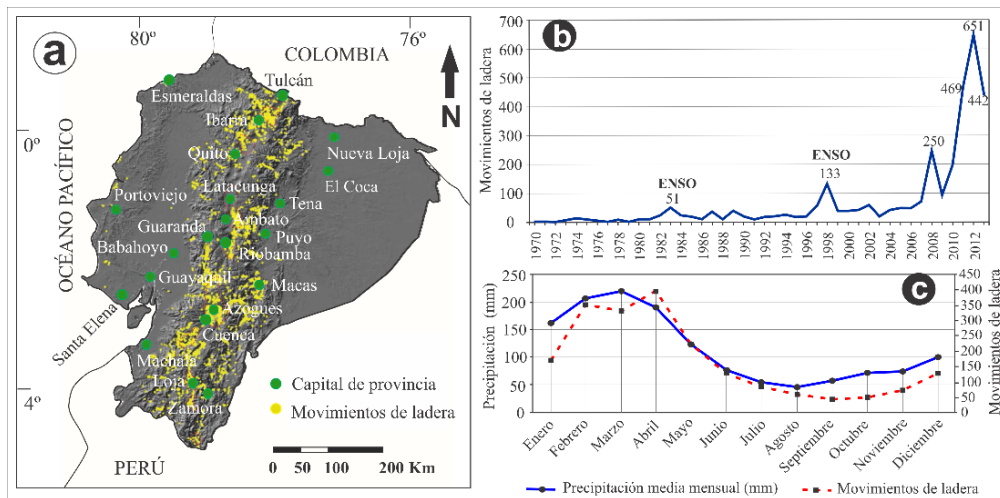


Figura 16. Situación de los movimientos de ladera en Ecuador a) Distribución geográfica de los movimientos de ladera en Ecuador (Fuente: INIGEMM, 2013) b) Distribución anual de movimientos de ladera ocurridos en Ecuador entre los años 1970-2013 (Fuente: Eras, 2014) c) Relación entre número mensual acumulado de movimientos de ladera frente a la precipitación media mensual, años 1970-2011 (Fuente: Eras, 2014).

Según la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos (SNGR/ECHO/UNISDR 2012), los desastres de mayor impacto se han asociado a fenómenos hidrometeorológicos, sismos, erupciones volcánicas, inundaciones y deslizamientos, sin dejar de mencionar aquellos eventos relacionados con epidemias e incidentes tecnológicos (accidentes de tránsito) en los que se

presenta una alta morbi-mortalidad, tratados como un tema de salud pública de alta prioridad. En la tabla 5 se detalla un registro de 5.523 eventos para el período 1970-2010, siendo las inundaciones y deslizamientos los eventos de mayor ocurrencia.

Tabla 5. *Eventos naturales ocurridos en el Ecuador, período 1970-2010. Fuente: SNGR/ECHO/UNISDR (2012).*

Tipo de evento	No.	Tipo de evento	No.
Inundaciones	1407	Escape	41
Deslizamientos	1050	Plaga	28
Incendios	985	Granizada	26
Lluvias	565	Tormenta eléctrica	17
Epidemia	220	Ola de calor	16
Sequía	131	Vientos huracanados	15
Incendio forestal	110	Hundimiento	11
Explosión	105	Helada	11
Contaminación	98	Biológico	11
Marejada	93	Pánico	7
Actividad volcánica	87	Alud	6
Tempestad	77	Lahares	5
Vandaval	72	Asentamientos	4
Sismo	71	Tornados	2
Desbordamiento	66	Sedimentación	2
Avenida torrencial	64	Nevada	2
Colapso estructural	60	Licuación	2
Aluvi3n	55	Cambio línea de costa	1
Total			5523

La figura 17a representa la cantidad de muertos y desaparecidos por evento, donde los deslizamientos son el primer causante de esto. Igualmente la figura

17b refleja las viviendas afectadas por tipo de evento, como un claro indicador del impacto de los desastres, en el que se evidencia que las inundaciones, lluvias y deslizamientos respectivamente son los principales causantes. De los datos de la Sala de Situación de la SNGR (Figura 17c), las provincias con mayor cantidad de eventos en el período 2010–2012 son Guayas y Loja; los eventos se asocian a fenómenos hidrometeorológicos.

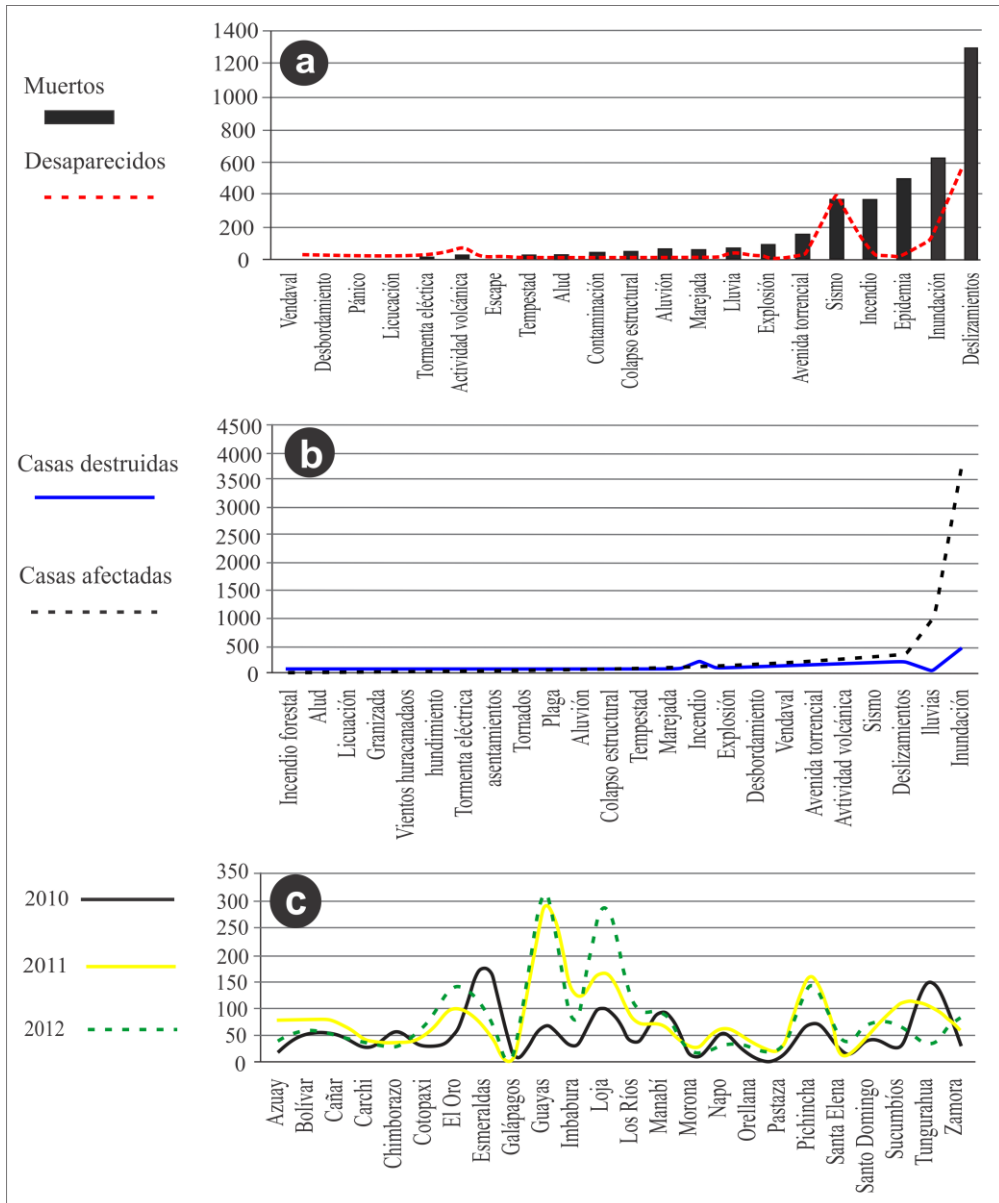


Figura 17. a) Muertos y desaparecidos por evento (1970 – 2010) b) Afectación de vivienda por tipo de evento (1970 – 2010) c) Número de eventos por provincia (2010 – 2012). Fuente: SNGR/ECHO/UNISDR (2012).

La ciudad de Loja está experimentando un rápido crecimiento durante la última década cubriendo la mayor parte del fondo del valle. También se han construido nuevas urbanizaciones en los bordes del valle, donde la construcción no es aconsejable debido a las malas condiciones del terreno y los altos gradientes de pendiente. Por lo tanto, han surgido importantes problemas de inestabilidad del suelo asociados a los movimientos de ladera con la ocupación de estas áreas y muchos de los nuevos barrios ya están experimentando las consecuencias de este desarrollo urbano incontrolado.

Una revisión de noticias e informes sobre daños causados por movimientos de ladera en la ciudad de Loja, desarrollados durante esta investigación revela que desde 2002 hasta 2013 hubo 46 movimientos de ladera que ocasionaron daños a edificios, carreteras o tuberías de agua (Figura 18). Algunos de los casos más significativos se resumen en la Tabla 6.



Figura 18. Daños ocasionados por los movimientos de ladera en la ciudad de Loja (Fuente: Diario “La Hora” y el autor).

Tabla 6. Resumen de algunos casos de movimientos de ladera con daños directos

Caso estudio	Fecha	Daños	Causa	Estimación económica de daños (\$)
Ciudadela "Reinaldo Espinoza"	Abril-92	2 casas destruidas	Lluvias	80.000
Colegio "Adolfo Valarezo"	Junio-99	1 edificio con grandes fisuras, afectación del graderío de cancha de basketball, y en el cerramiento.	Lluvias	200.000
Colegio "27 de Febrero"	Nov.-99	Cerramiento, canchas deportivas y baños	Lluvias	25.000
UV Televisión	Nov.-99	Patio y calle	Lluvias	50.000
Ciudadela "La Florida"	13/11/2011	14 casas destruidas y 40 en riesgo	Lluvias	560.000
Ciudadela "La Banda"	09/02/2013	3 casas destruidas, 180 fisuradas, daños en la vía	Lluvias	800.000
Calle Villonaco, "Obra Pía"	01/11/2007	2 casas destruidas y 1 muerto	Lluvias	60.000
Chirimoyo, "Salapa alto"	23/06/2007	Conducción de agua de la ciudad	Lluvias	5.000
Sector "Sierra Nevada"	26/03/2015	1 casa, 6 muertos	Lluvias	20.000

CAPÍTULO III

GENERACIÓN DE INVENTARIOS Y CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA Y DINÁMICA DE LOS MOVIMIENTOS DE LADERA

3.1 MAPA DE INVENTARIO DE MOVIMIENTOS DE LADERA

La identificación y caracterización de los movimientos de ladera llevado a cabo a través de las técnicas clásicas de fotointerpretación y trabajo de campo a escala 1:5.000 hasta el año 2015 ha permitido inventariar un total de 292 movimientos de ladera (anexo 4) con un total de área movida de 417,9 hectáreas (Figura 19). Los movimientos de ladera más característicos del valle de Loja tienen longitudes que oscilan entre los 100 a 250 m y los anchos oscilan entre los 60 a 150 m, pero se han cartografiado movimientos de ladera de hasta 1.200 m de largo y 250 m de ancho.

La mayoría de los movimientos de ladera movilizaron volúmenes de material entre 15.000 y 750.000 m³, pero en algunos casos contienen hasta 2'000.000 m³. Estas magnitudes son aproximadas porque sus dimensiones y geometrías reales son difíciles de determinar, ya que muestran límites difusos en muchos de los casos. La mayoría de los movimientos de ladera comienzan como procesos de reptación y, a menudo, evolucionan a flujos de tierra o movimientos complejos. También hay ejemplos de deslizamientos traslacionales favorecidos por la estratificación inclinada asociada con la topografía de superficie de cuesta.

La Figura 20 indica la distribución porcentual de los movimientos de ladera de acuerdo a su tipología. El 55,7% son tipo reptación que corresponden a 223,5 ha; el 38,8% son de tipo flujo y ocupan 154,5 ha. Es importante resaltar que la mayor parte del área de se encuentra afectada por procesos de reptación que evolucionan a flujos de tierra.

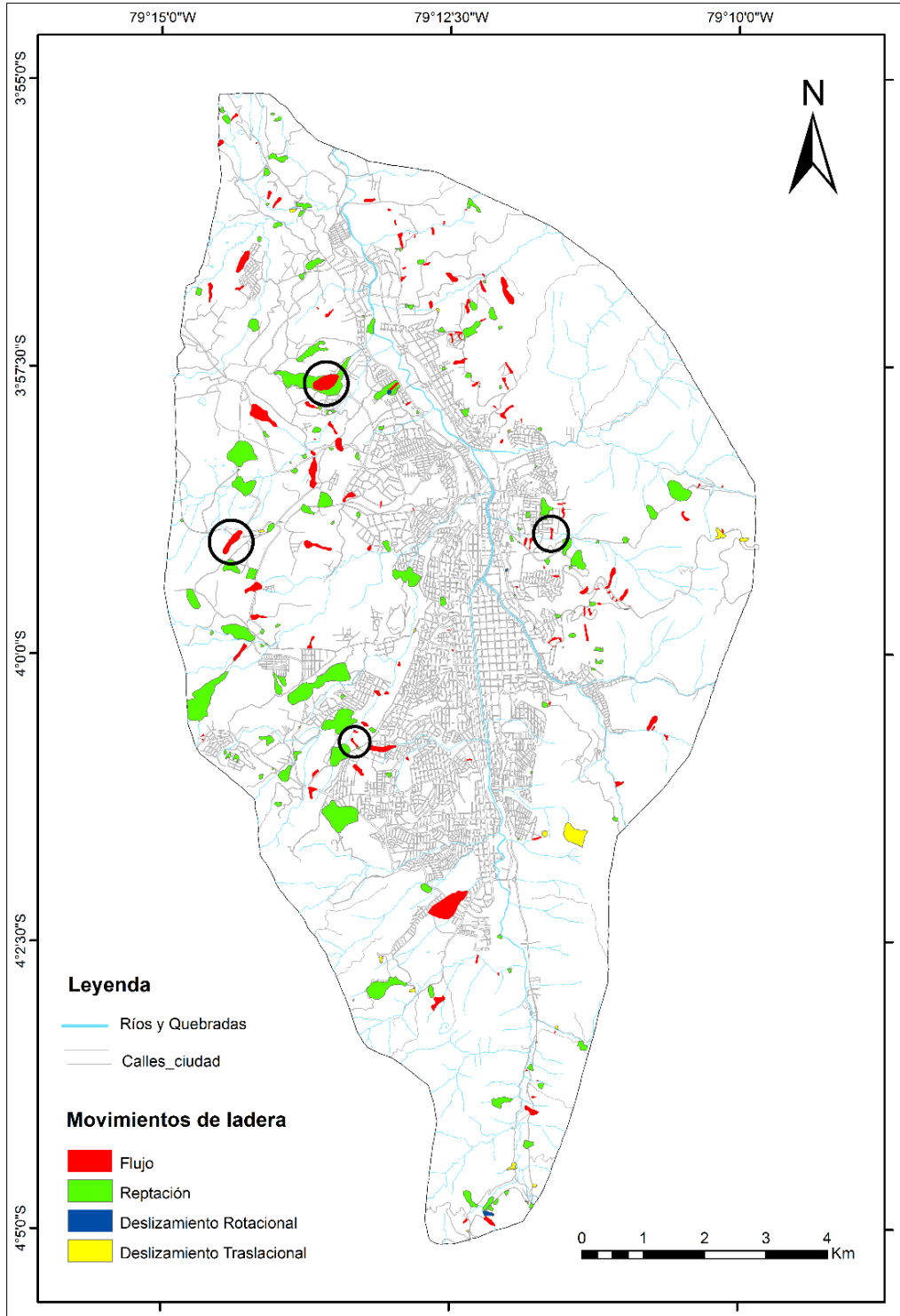


Figura 19. Mapa de inventario de movimientos de ladera hasta el año 2015. Los círculos indican los 4 casos estudiados en el capítulo siguiente.

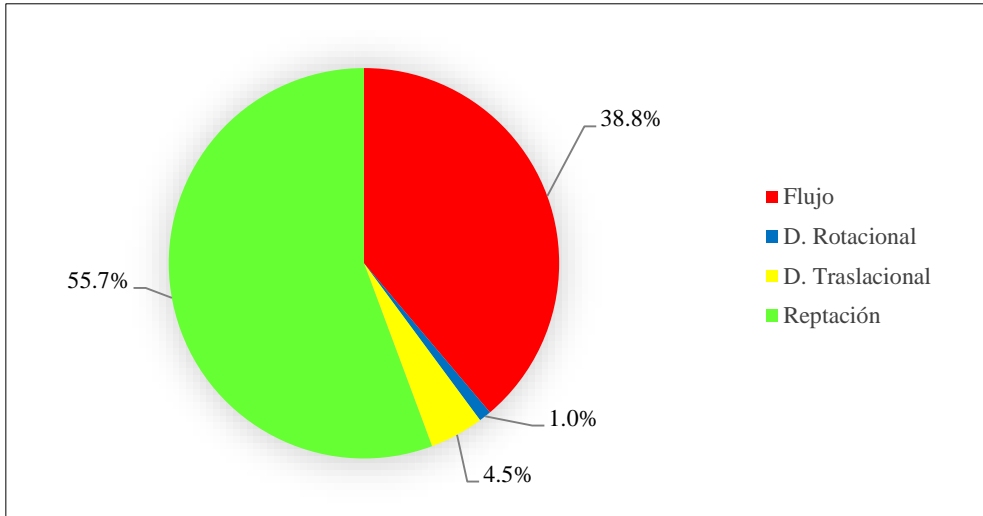


Figura 20. Distribución porcentual de los movimientos de ladera inventariados, clasificados por tipología.



Figura 21. Movimientos de ladera tipo reptación

La tipología de los movimientos de ladera se realiza utilizando la clasificación de Varnes 1978 y Hungr 2014. En el caso de reptación se debe indicar que toda la zona muestra evidencias de este tipo de proceso; sin embargo, para realizar

una diferenciación de esta tipología se ha utilizado el criterio siguiente: *cuando en el terreno se observa la presencia de zonas de rotura o agrietamiento con límites difusos sin que hayan evolucionado a flujo*, los clasificamos como reptación (Figura 21). Las figuras 22, 23 y 24 representan las tipologías de movimientos de ladera tipo flujo, traslacional y rotacional identificados durante el inventario.



Figura 22. *Movimientos de ladera tipo flujo*



Figura 23. *Movimientos de ladera clasificado como Deslizamiento traslacional*



Figura 24. Movimiento de ladera clasificado como Deslizamiento rotacional

3.1.1 Mapa de inventario multitemporales

Para la generación del inventario multitemporal de los movimientos de ladera, partimos de una primera fase de fotointerpretación utilizando fotografías aéreas a escala 1:7.000 del año 2003, ortofoto a escala 1:5.000 del año 2010. Luego se continua con la segunda fase que es la realización del inventario de campo (base principal del inventario), utilizando para ello un mapa topográfico a escala 1:5.000. Obteniendo así los mapas de inventario multitemporales.

El procedimiento seguido para generar los inventarios multitemporales de los movimientos de ladera ha sido el siguiente:

Periodo 1 [**P1** (1999-2003)].- Se parte de un inventario de campo realizado en el año 1999 en el cual se tuvo la oportunidad de participar e inventariar los movimientos de ladera recientes, dado que fue la primera vez que a la ciudad se la declaró en emergencia por los movimientos de ladera. Complementando con la fotointerpretación de las fotografías aéreas del año 2003 a escala 1:7.000, y con ello obtener el mapa de inventario del periodo 1 (Figura 25).

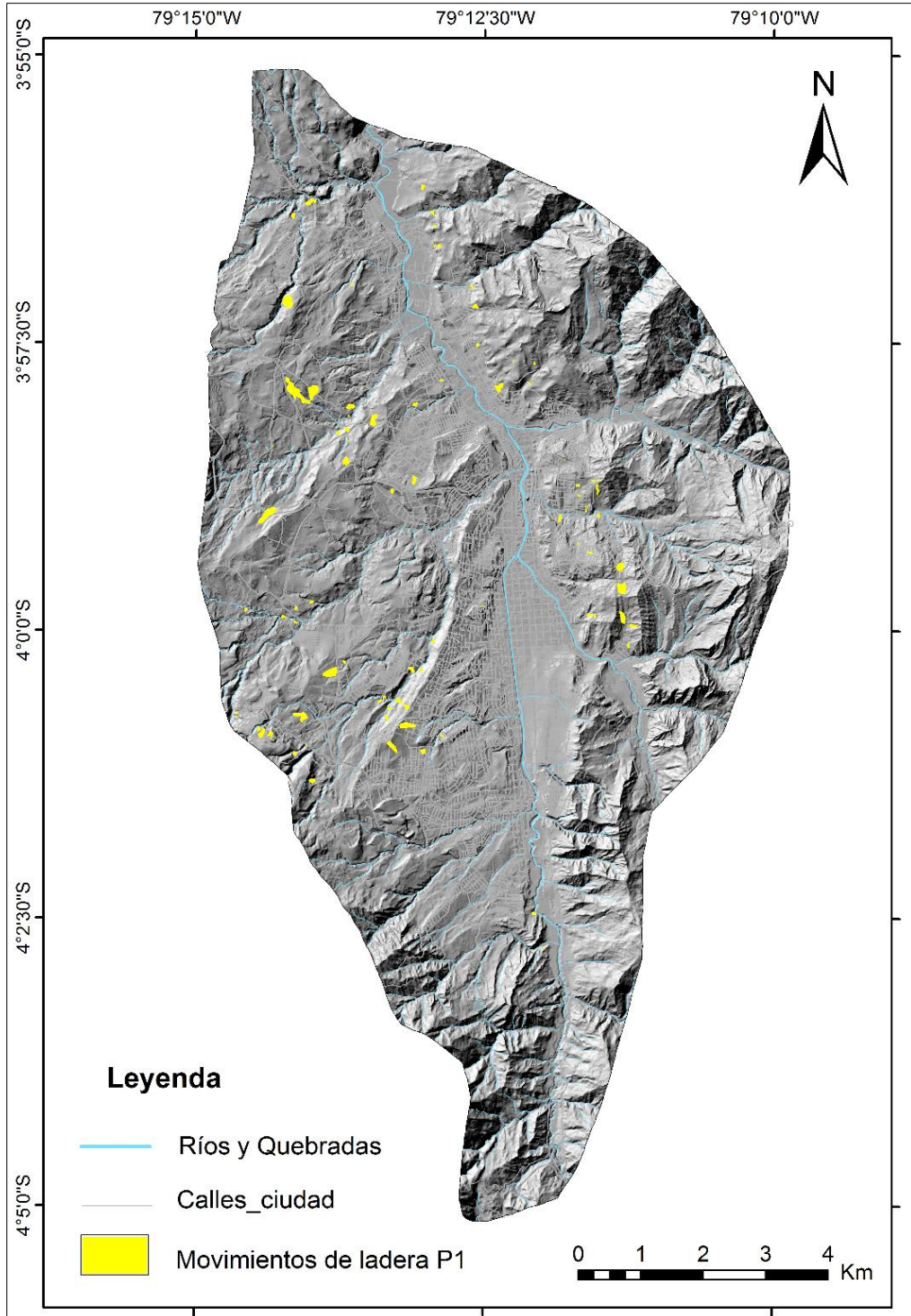


Figura 25. Mapa de inventario de movimientos de ladera del periodo 1 (años 1999-2003)

Periodo 2 [P2 (2003-2010)].- Para esto se parte del inventario del P1, para determinar los nuevos hasta el años 2010. Para ello se realiza una revisión con el apoyo de la ortofoto a escala 1:5.000 del año 2010 y sobre la base de esta fotointerpretación se planifica un trabajo de inventario de campo sobre el mapa topográfico a escala 1:5.000. Obteniéndose así el inventario del periodo 2 (Figura 26).

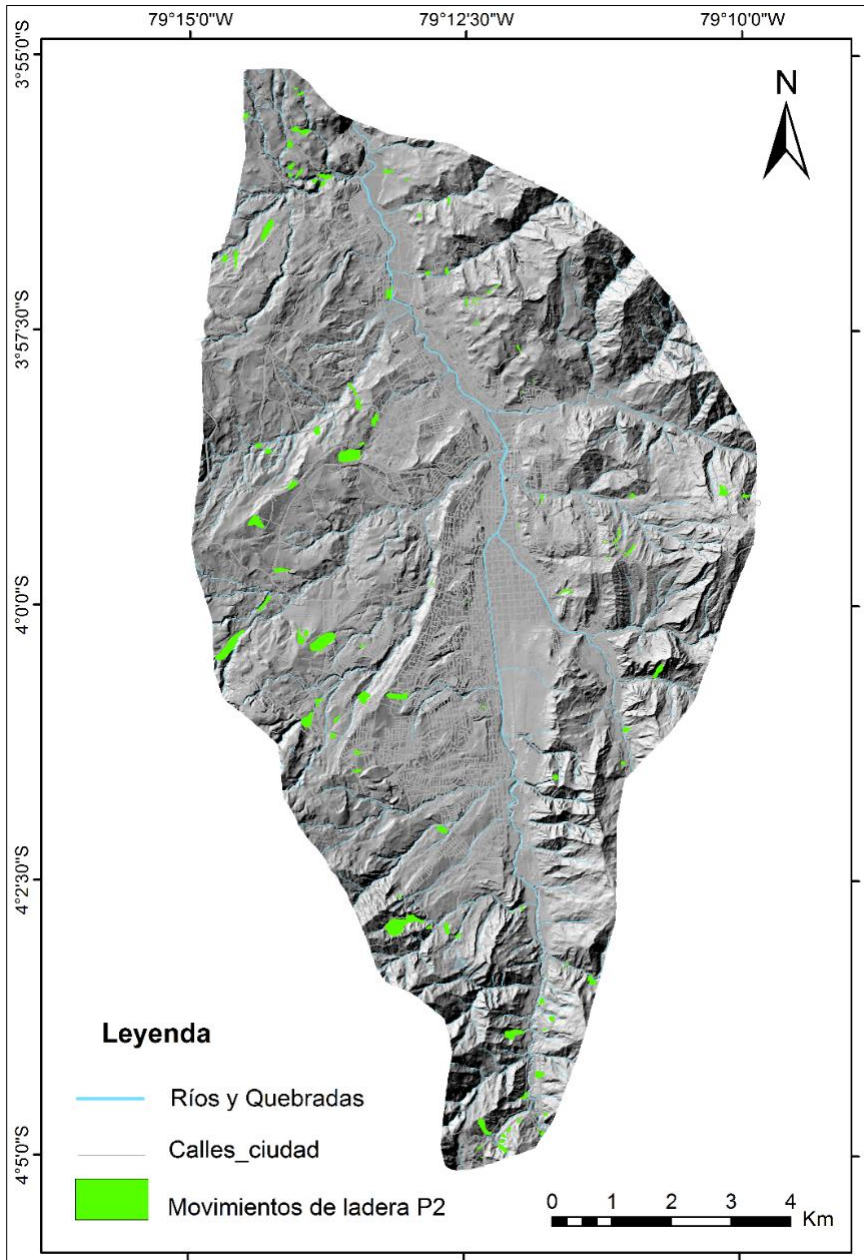


Figure 26. Mapa de inventario de movimientos de ladera del periodo 2 (años 2003-2010)

Periodo 3 [P3 (2010-2015)].- El inventario generado en este periodo se realiza exclusivamente en base a trabajo de campo realizado en el año 2015, utilizando igualmente el mapa topográfico a escala 1:5.000 con énfasis a los nuevos movimientos de ladera ocurridos desde el año 2010 (Figura 27).

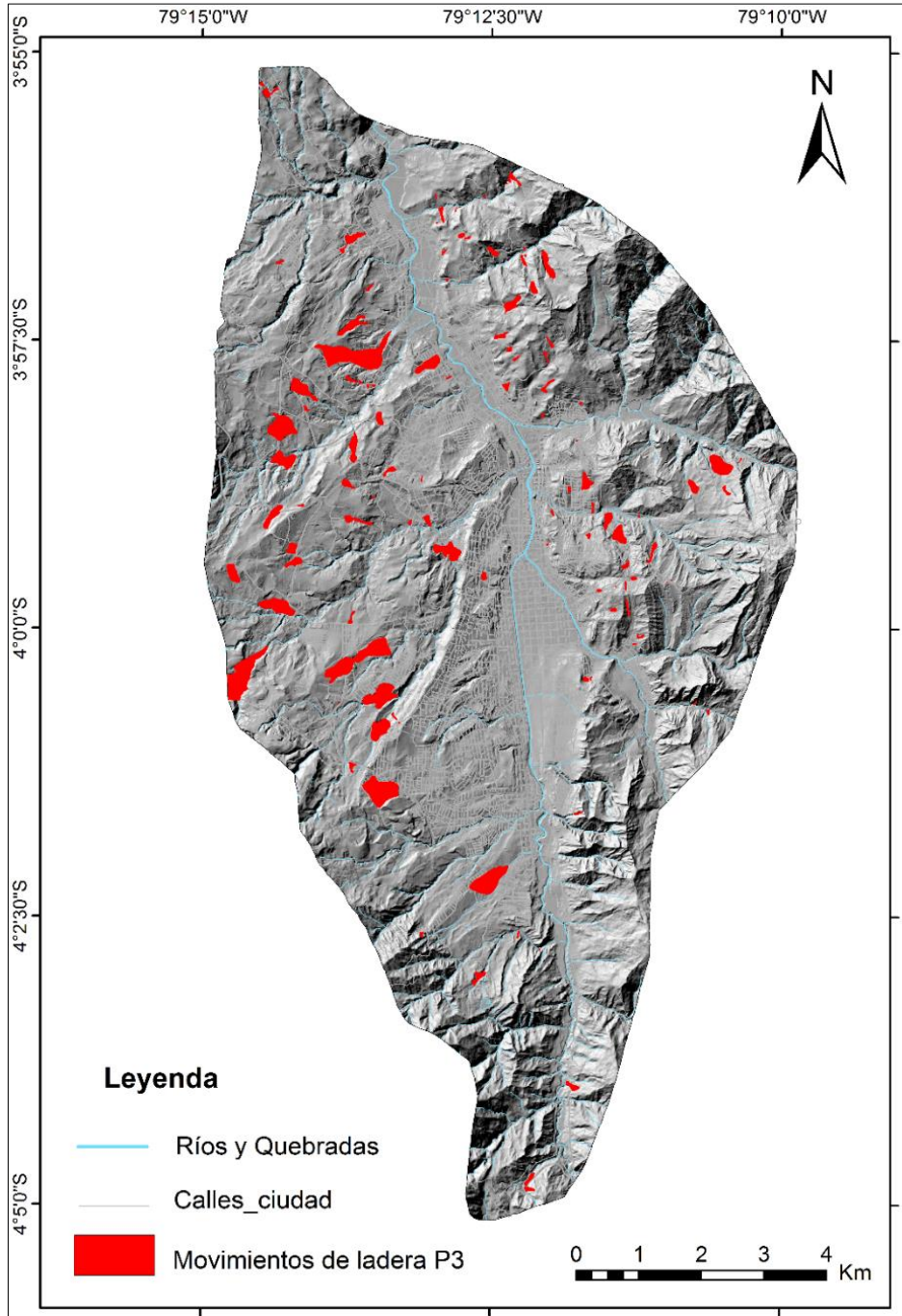


Figure 27. Mapa de inventario de movimientos de ladera del periodo 3 (años 2010-2015)

3.2 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA Y DINÁMICA DE MOVIMIENTOS DE LADERA

Anteriormente se mencionó sobre el rápido crecimiento urbano que está teniendo la ciudad de Loja en las últimas décadas, lo que conlleva a ocupar la mayor parte de la zona montañosa situada en el fondo del valle. La ocupación de estas áreas ha generado considerables problemas de inestabilidad en el suelo asociados con los movimientos de ladera, a lo cual se suma la presencia de un clima tropical húmedo y las características geológicas asociada principalmente con las arcillas, limolitas y los depósitos coluviales en ambientes fluviales y lacustres de la cuenca sedimentaria de Loja. Por ello hemos abordado un estudio de detalle analizando con la mayor precisión posible cuatro deslizamientos activos más representativos de la zona de estudio.

3.2.1 Características generales de los movimientos de ladera seleccionados

Los cuatro movimientos de ladera seleccionados ("La Florida", "El Plateado", "San Cayetano" y "Chontacruz") se representan en la figura 28, cuyas principales características se muestran en la tabla 7.



Figura 28. Fotografías de los movimientos de ladera analizados a detalle.

Tabla 7. Sumario de características y daños de los casos estudiados.

Caso estudio	Método de monitoreo	Tiempo monitoreo (mese)	Pendiente	Detonante	Fecha de ocurrencia	Ratio de movimiento (mm/año)
La Florida	DGPS	4	15°	lluvia	13-nov-11	6840
El Plateado	DGPS	4	10°	vibración y actividad antrópica	02-nov-08	3430
San Cayetano	DGPS	4	20°	lluvia	28-feb-12	174
Chontacruz	DGPS	4	40°	lluvia	07-feb-10	4630

Caso estudio	Material del plano de rotura	Tipología	Profundidad del plano de rotura (m)	Masa movilizada (m ³)	Daños	Elementos en riesgo
La Florida	Arcilla y limos arcilloso	Complejo (reptación-flujo)	30	750000	14 casas	40 casas
El Plateado	Arcillas	Reptación	3.5	63502.47	Vía Panamericana to Catamayo	10 casas y vía
San Cayetano	Arcillas y limos	Flujo	3.2	15393.43	2 casas	22 casas
Chontacruz	Arcillas y limos	Reptación	10	105600	1 casa, cancha deportiva de hormigón y vía	10 casas y vía

a) Caso “La Florida”

El 13 de noviembre del 2011 una intensa lluvia desencadenó el movimiento de ladera “La Florida” ubicado al noroccidente de la zona urbana de la ciudad de Loja. Inicialmente, la actividad del deslizamiento comenzó a manifestarse sólo como algunas grietas en el suelo. Poco después, otro evento de lluvia intensa ocurrió el 28 de noviembre de 2011 y reactiva el movimiento de ladera, y finalmente en 4 días se desencadenó el deslizamiento como un flujo aparentemente lento debido a su baja pendiente. Las dimensiones son de una longitud máxima de 250 m y una anchura máxima de 150 m., considerando un espesor medio de masa desplazada de 20 m aproximadamente, da un volumen de 750.000 m³.

El deslizamiento afectó a 14 viviendas (Figura 29) con daños severos, según el sistema de valoración de daños propuesto por Cooper (2008). Se estima que alrededor de 40 viviendas más se encuentran en riesgo. Además, se produjeron daños en las vías y se suprimió por algunos días los servicios básicos como luz y agua, al igual que el servicio de transporte urbano se limitó a zonas con buen acceso. Los costos directos estimados por afectación de viviendas correspondieron a 560.000 dólares aproximadamente.

b) Caso “El Plateado”

Se localizó al NW de la ciudad, en el barrio “El Plateado”, en el Km 4 de la vía panamericana Loja-Catamayo. El 2 de noviembre del 2008 empezó a generar problemas de deformación en la vía incluyendo grietas, fisuras asentamientos en la carretera y lobulaciones en laderas circundantes. Estas características fueron ocasionadas por la reptación del movimiento de ladera, y que es recurrente durante todo el tiempo hasta la fecha. La zona de influencia directa e indirecta del movimiento de ladera, cubre una superficie de 26 ha y el volumen de masa desplazada es de 63.502,47 m³ considerando una profundidad de 3,5 m y una pendiente de 10°.

c) Caso “San Cayetano”

Las fuertes lluvias durante más de una semana desencadenaron un movimiento de ladera rápido y superficial el 28 de febrero de 2012 en el barrio llamado "San Cayetano Bajo" situado al NE de la ciudad. El movimiento de ladera destruyó una casa y estimamos que otras 22 viviendas pueden estar en riesgo. Considerando una profundidad de 3,2 m tiene un volumen de masa desplazada de 15.393,43 m³. El área de afectación directa e indirecta es de 1,4 ha.

d) Caso “Chontacruz”

Ubicado al sur occidente de la ciudad de Loja, ocurrió el día 7 de febrero del 2010, en dos días de intensas lluvias, provocando hundimiento y desplazamiento de la carretera, destrucción de un patio de hormigón y destrucción de una casa. En cabecera se desencadena como rotacional, pero al pie del mismo se puede verificar que se trata de un movimiento complejo que evoluciona como flujo aparentemente lento. Las dimensiones son de una longitud máxima de 220 m y una anchura máxima de 48 m., considerando un espesor medio de masa desplazada de 10 m aproximadamente, da un volumen de 105.600 m³. Morfológicamente ocurre en una zona de pendiente alta con 40° de inclinación.

3.2.2 Metodología aplicada a los cuatro casos

Aplicamos diferentes técnicas para proporcionar información sobre las principales características geotécnicas de estos movimientos de ladera. Las tasas de movimiento superficial se estimaron mediante el monitoreo con DGPS (Differential Global Positioning System) (Tagliavini et al. 2007; Acar et al. 2008; Acar 2010; Yin et al. 2010a; Zarate 2011; Calcaterra y et al. 2012; Wang 2012; Dogan et al. 2013). Los métodos basados en GPS son efectivos para medir los desplazamientos en movimientos de ladera porque permiten medir tasas de movimientos muy bajas como varios milímetros por año (Zhou et al. 2005). En la actualidad, esta técnica no es demasiado cara ni demasiado exigente y se puede aplicar cuando la monitorización continua no es esencial para los

objetivos del estudio (Rizzo 2002; Brückl et al. 2006; Noferini et al. 2007; Coltorti et al. 2011). La geometría de los movimientos de ladera, los planos de falla y las áreas caracterizadas por un alto contenido de agua se establecieron analizando los perfiles longitudinales y transversales de ERT (Tomografía de Resistividad Eléctrica) (Lapenna et al. 2003; Colangelo y Perrone 2012; Merritt et al. 2014). Los factores causales se establecieron a través de caracterizaciones geotécnicas y mineralógicas de los materiales involucrados en los movimientos de ladera (Yilmaz y Karacan 2002; Azañón et al. 2010; Regmi et al. 2013; Grana y Tommasi 2014). Los umbrales de precipitación o de reactivación de los movimientos de ladera se definieron realizando un análisis de las series temporales de precipitación. Este análisis se realizó mediante una simple comparación entre la precipitación acumulada registrada durante el período húmedo relacionado con cada movimiento de ladera y la precipitación media para el mismo período al considerar las series de lluvias existentes (1964-2014) para el área de estudio (Irigaray et al. 2000; Irigaray y Palenzuela 2013; Palenzuela et al. 2015). Este último fue un análisis preliminar al que más adelante se describe en el capítulo V.

3.2.2.1 Monitoreo con GPS Diferencial (DGPS)

El movimiento superficial de los cuatro movimientos de ladera fue medido usando una red de monitoreo con GPS diferencial (DGPS). Esta red de monitoreo DGPS constó de 26 puntos de control. Para ello se usaron simultáneamente dos receptores: Un receptor ocupa un punto denominado “estación base” ubicado en la UTPL, del cual se conocen las coordenadas precisas, en base a puntos de primer orden de la red nacional del Instituto Geográfico Militar (IGM). Y otro receptor móvil denominados también “rovers” en cada una de las 25 estaciones de control cuyas coordenadas se desconocen. La distancia entre la estación base y los puntos de control en la zona de estudio alcanza los 5 Km, una distancia aceptable dentro del rango de trabajo del equipo, que da un radio máximo entre estación fija y móvil de 10

km. La figura 29 muestra la posición de los 25 puntos de control instalados dentro de las cuatro áreas de estudio. Los puntos de control consisten en hitos de hormigón de 50 cm de altura y 20 cm de diámetro.

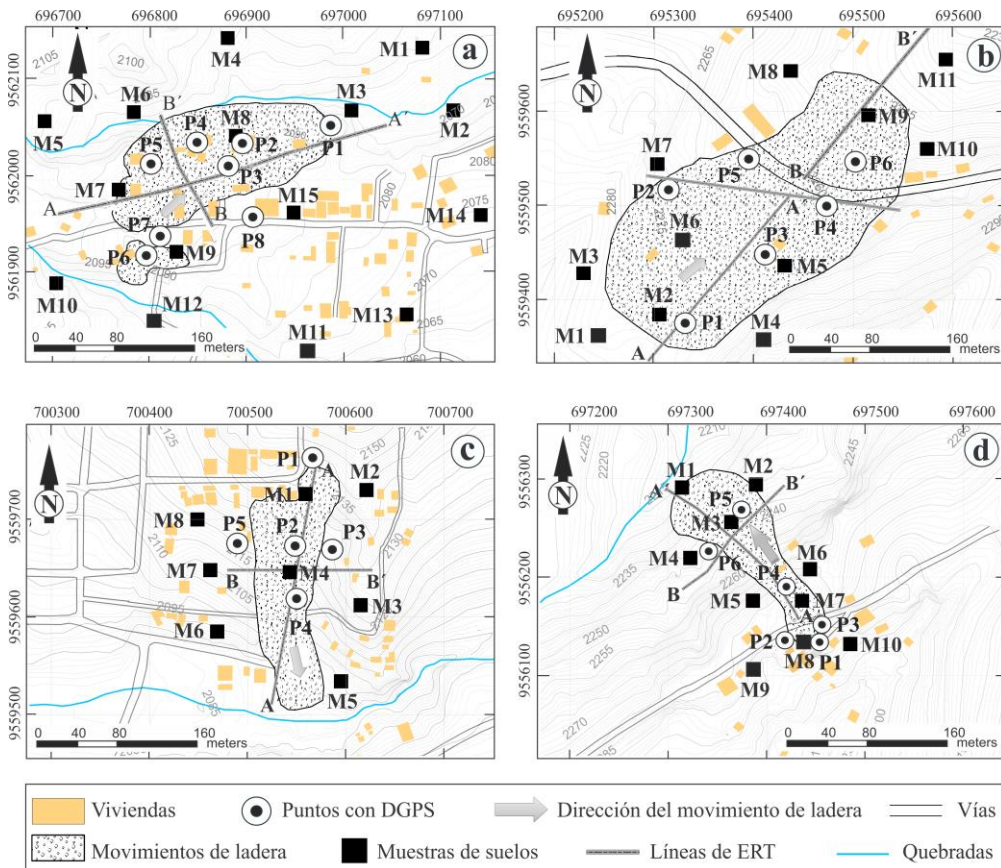


Figura 29. Ubicación de los perfiles sísmicos y ERT, puntos DGPS, muestras de suelo en cada sitio de investigación.

Se realizaron cuatro campañas con DGPS en los cuatro movimientos de ladera estudiados entre octubre de 2012 y febrero de 2013. En todas las campañas de monitoreo se utilizó un DGPS de doble frecuencia *Trimble R6*. Un receptor fue colocado en la “estación base”, mientras que el móvil o “rovers” fue movido entre los 25 puntos de control para recoger los datos (Figura 30). Este fue configurado en el modo *fast static* para almacenar las mediciones con un intervalo de 15 segundos, durante 25 minutos de permanencia en cada estación

móvil con una máscara de elevación de 10° durante todos los monitoreos (Liu et al. 2005; Sdao et al. 2005; Tagliavini et al. 2007; Acar 2010; Abidin et al. 2011). Los datos se procesaron después utilizando el software Trimble Business Center versión 2.2 y se alcanzó una precisión aceptable de 0,005 m ± 0,5 ppm. Las observaciones se registraron utilizando el sistema de coordenadas UTM (Zona 17 S) y el datum WGS84.



Figura 30. Equipo DGPS y tipo de mojón utilizado: a) Receptor fijo o “estación base” b y c) Receptor móvil o “rovers”

Después del procesado de datos y obtenidas las coordenadas exactas de cada punto de monitoreo, se calcula la diferencia entre coordenadas (N, E, Z), que nos dará el desplazamiento (δ) tanto en las componentes Este (δ_E) y Norte (δ_N) entre la primera y última medida (Sdao 2005). Después se obtiene el vector resultante de esas componentes (δH) en cada punto monitoreado con la utilización de la siguiente ecuación:

$$\delta H = \sqrt{(\delta E)^2 + (\delta N)^2} \quad (1)$$

Se realiza un análisis de congruencia estadística con los vectores δH y δZ para comprobar estadísticamente los desplazamientos de cada punto utilizando el

método de estimación por intervalos. Con un nivel de confianza del 99% y su valor crítico ($Z_{\alpha/2}$) de 2,58. Con lo cual se calcula el vector desplazamiento máximo horizontal (Δ_{maxH}) y vertical (Δ_{maxZ}), utilizando las ecuaciones siguientes (Özer y Mentese 2007):

$$\Delta_{maxH} = Z_{\alpha/2} \sqrt{E_E^2 + E_N^2} \quad (2)$$

$$\Delta_{maxZ} = Z_{\alpha/2} \sqrt{E_Z^2 + E_Z^2} \quad (3)$$

E_E , E_N es el error estándar para las componentes este y norte (δ_E, δ_N), que en este estudio se considera de 1,5 mm y E_Z es el error estándar para la deformación vertical (δ_Z) cuyo valor considerado es 2 mm (Zarate 2011; Özer y Mentese 2007).

Aplicando la hipótesis general de prueba lineal (Leick 2004; Abidin 2008) se verifica si existe o no desplazamiento de los puntos monitoreados en el movimiento de ladera.

Si, $\delta H > \Delta_{maxH}$ hay movimiento

Si, $\delta Z < \Delta_{maxZ}$ no hay movimiento

Verificadas las hipótesis, la deformación efectiva (Δ_e) es definida como el desplazamiento real del punto de monitoreo. Por tanto la deformación efectiva horizontal ($\Delta_e H$) es la diferencia entre δH y Δ_{maxH} . Igualmente la deformación efectiva vertical ($\Delta_e Z$) es la diferencia entre δZ y Δ_{maxZ} . Con las deformaciones efectivas, se procede a obtener la velocidad de los puntos desplazados en el monitoreo, y se incluye la clasificación del movimiento de acuerdo a la escala de velocidad de movimientos de ladera (Cruden y Varnes 1996). El cálculo se

lo realiza con las deformaciones efectivas ($\Delta_e H$) y el periodo transcurrido entre la primera y última medición. La ecuación utilizada es la siguiente:

$$V = \frac{\Delta_e H}{t} \quad (4)$$

Donde V es velocidad; $\Delta_e H$ deformación efectiva y t el tiempo

3.2.2.2 Tomografía de resistividad eléctrica (ERT)


Para conocer la geometría en profundidad de los movimientos de ladera se utilizó la tomografía de resistividad eléctrica (ERT), que proporciona información detallada de la resistividad del subsuelo. La ERT consiste de una matriz de electrodos lineales, donde una corriente eléctrica se inyecta de forma consecutiva a través de un par de electrodos desde la fuente y la diferencia de potencial se registra entre otro par de electrodos. La resistividad aparente (φ_a) se determina por la relación del potencial (V) y la intensidad de corriente (I) multiplicado por un factor de geometría (K), con la ecuación siguiente:

$$\varphi_a = (V/I) \cdot K \quad (5)$$

El equipo utilizado es el ABEM Terrameter SAS 4000, con sistema LUND multielectrodo para estudios de alta resolución en 2 y 3 D. Con un selector de electrodos ES464 y una batería de 12 V de corriente continua. El equipo tiene una resolución de 25 mV (teórico, 1 segundo de tiempo de integración), tres rangos de medición automática (± 250 mV, ± 10 V y ± 400 V) y una precisión del 1% en todo el rango de temperaturas (ABEM, 2010). El dispositivo electródico utilizado en este estudio es dipolo-dipolo (recomendable debido a que la gran cantidad de datos adquiridos produce una mayor discretización del medio - Weinzettel 2009).

En total, se realizaron ocho líneas de ERT. Se ejecutaron dos líneas por cada movimiento de ladera, uno longitudinal y otro transversal al cuerpo del movimiento de ladera, excepto el caso "El Plateado" que fue cubierto por dos líneas longitudinales de ERT, una a cada lado de la carretera panamericana. La figura 29, muestra las ubicaciones de los perfiles de ERT y la Figura 31 contiene los espaciamientos de electrodos usados en cada perfil y el equipo de ERT.

Caso estudio	Perfiles ERT	No. Electrodo	Separación electrodos (m)	Longitud total (m)
Florida	A - A'	72	5	360
	B - B'	72	2	144
Plateado	A - A'	76	3	228
	B - B'	76	3	228
San Cayetano	A - A'	72	3.5	252
	B - B'	72	2	144
Chontacruz	A - A'	70	3	210
	B - B'	74	2	148



Una fotografía que muestra el equipo de ERT (Electrode Resistance Tomography) en un campo. Se ven varios cables conectados a un dispositivo central, con bobinas de cables de colores (naranja y negro) a los lados. El fondo muestra un terreno con vegetación y una estructura blanca.

Figura 31. Espaciamiento de los electrodos utilizados en cada perfil y equipo de ERT

Los datos obtenidos se procesaron mediante el software RES2DINV® versión 3.59 con el cual se hace inicialmente un filtrado de datos, y se procede a realizar modelos de inversión incluyendo la topografía de los perfiles de ERT (Loke 2012). Como resultado, se obtienen los modelos 2D con la resistividad eléctrica de los materiales de estudio. Los mejores resultados se obtuvieron utilizando una inversión robusta y los errores máximos se situaron entre 3,0 y 9,2%.

3.2.2.3 Caracterización geotécnica

La caracterización geotécnica de los materiales geológicos implicados en los movimientos de ladera, se realizó a través del análisis de 44 muestras de suelo (anexo 5) recogidas a profundidades de 1-2 m. La localización de las muestras se indica en la Figura 29. Las superficies de rotura se caracterizaron mediante la recogida de ocho muestras de la zona próxima al plano de rotura. El contenido de humedad, la distribución del tamaño de las partículas y los límites de

Atterberg se determinaron de acuerdo con las normas ASTM D2216 ASTM D422/00 y ASTM D4318/00, respectivamente. La cohesión y el ángulo de fricción interna se establecieron por medio de ensayos triaxiales comunes UU (Unconsolidated Undrained) que se ajustaron a la norma ASTM D2850.

3.2.2.4 Análisis mineralógico de las arcillas

Se utilizó la difracción de rayos X (DRX) para determinar la composición mineralógica de los materiales involucrados en los movimientos de ladera estudiados. Los análisis de DRX se realizaron tanto en muestras enteras no orientadas como en agregados orientados de la fracción $<2 \mu\text{m}$, separada por centrifugación. Este análisis se realiza teniendo especial cuidado en caracterizar la abundancia relativa de minerales de arcilla del grupo de la esmectita en los suelos. El contenido de esmectita de los suelos arcillosos puede determinar su plasticidad, compresibilidad y presión de hinchamiento (Gillot 1986; Azañón et al. 2010). La fuerte interacción entre los minerales arcillosos y el agua resulta de: a) las altas superficies específicas de los minerales arcillosos; b) la estructura de los minerales de arcilla, y c) la naturaleza polar de las moléculas de agua. La identificación de la esmectita fue corroborada usando tratamientos de etilenglicol (EGC) a una temperatura de 550° . El tratamiento con etilenglicol es uno de los métodos más utilizados para la identificación de minerales de arcilla (MacEwan y Wilson 1980; Moore y Reynolds 1997). Cuando una muestra de esmectita se expone a EGC, el H_2O es reemplazado por esta sustancia orgánica, induciendo un cambio en la estructura y las posiciones de pico en los rastros XRD.

3.2.2.5 Análisis de precipitación para los cuatro casos

Con el objetivo de analizar el factor desencadenante de los eventos de movimientos de ladera, se realizó un análisis mediante series temporales de la precipitación en el valle de Loja. Para ello se utilizaron los datos proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología y registrados en la

estación meteorológica "La Argelia". El procesamiento de datos implica los siguientes pasos:

Primero, se tomó en cuenta la precipitación mensual para cada año de todo el registro para determinar la precipitación media de cada mes. Estos valores se indican en la columna "Precipitación acumulada (mm) (1964-2014)" de la tabla 8. Los meses más secos se omitieron, mientras que se mantuvieron todos los más cercanos a las fechas de los movimientos de ladera. Del mismo modo, se incluyeron en la tabla 8 las precipitaciones mensuales para cada período interanual relacionado con cada ocurrencia del movimiento de ladera. Se evaluó la precipitación total acumulada durante cada período y sus porcentajes con respecto a los valores medios, de modo que los primeros se pueden comparar con los segundos.

Tabla 8. *Precipitaciones acumuladas y totales durante el período más lluvioso que cubre los meses de septiembre a mayo*

Meses	Precipitación acumulada para los valores medios de Sep. a Mayo (mm) (1964-2014)	Porcentaje de lluvia acumulada para el intervalo Sep. - Mayo (%) para cada caso		
		El Plateado	Chontacru z	La Florida & San Cayetano
		2008-2009	2009-2010	2011-2012
Septiembre	43.36	47.51	128.22	207.09
Octubre	115.55	188.94	96.55	112.06
Noviembre	182.73	153.18	38.7	232.08
Diciembre	268.09	147.96	138.71	191.78
Enero	358.86	146.53	65.44	161.95
Febrero	483.57	72.33	87.88	161.65
Marzo	619.98	98.52	33.94	44.35
Abril	713.64	99.4	80.93	104.42
Mayo	774.6	71.04	115.99	134.7
Precipitación media total Sept. a Mayo. (mm):	774.6	880.2	631.5	1079.3
% Relativo a la precipitación total media de Sep. a Mayo (774,6 mm):		113.63	81.53	139.33

En segundo lugar, para cada movimiento de ladera, la tendencia mensual de la precipitación se mostró trazando la precipitación mensual acumulada para cada período interanual (línea continua negra en la figura 32) junto con los valores

medios esperados (línea negra discontinua en la figura 32), que se observa en la "Precipitación acumulada (mm) (1964-2014)" de la tabla 8.

Al comparar ambas curvas, la divergencia de lluvia puede visualizarse fácilmente en la tabla 8. Además, el porcentaje de lluvia acumulada con respecto a los valores medios (línea punteada negra con triángulos en la figura 32) también se marco para mostrar la curva que refleja esa divergencia.

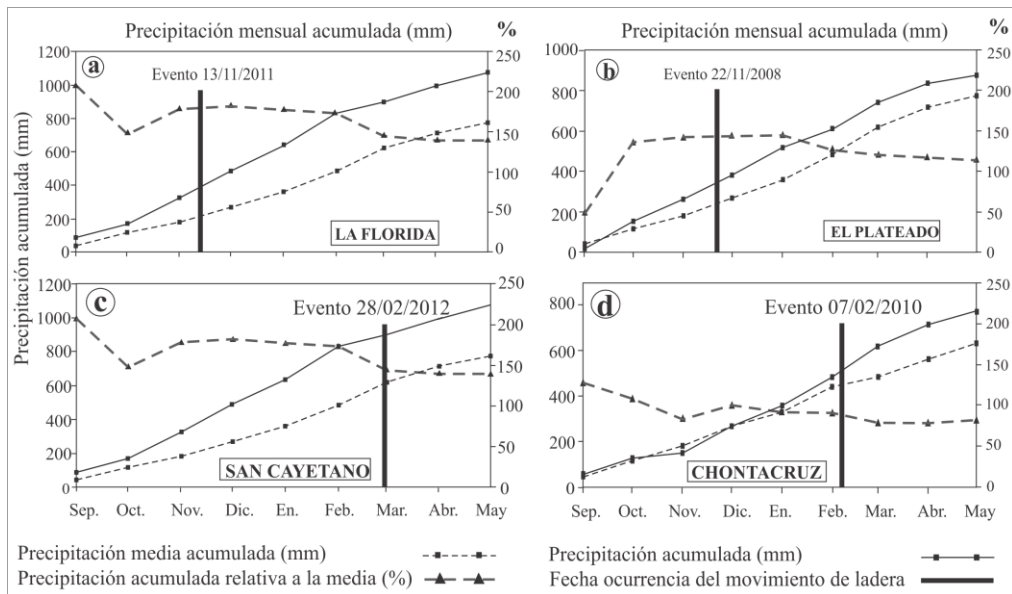


Figura 32. Precipitación acumulada durante el período más lluvioso que afecta cada movimiento de ladera estudiado.

3.2.3 Resultados obtenidos de los cuatro casos seleccionados

3.2.3.1 Cinemática de los movimientos de ladera

El monitoreo realizado con DGPS para los cuatro movimientos de ladera seleccionados proporcionó información útil sobre su cinemática. A excepción de "San Cayetano", todos ellos pueden ser descritos como movimientos lentos (Cruden y Varnes 1996). Los movimientos de ladera "La Florida", "El Plateado" y "Chontacruz" muestran tasas de desplazamiento de varios metros por año, con valores medios de 6,8; 3,4 y 4,6 m/año respectivamente, mientras que el "San Cayetano" muestra tasas de movimiento en torno de ~0,2 m/año (Figura 33). Es

importante señalar que se ha detectado ligeros desplazamientos en puntos adyacentes a los movimientos principales que indican la inestabilidad potencial de las laderas que rodean las áreas aledañas.

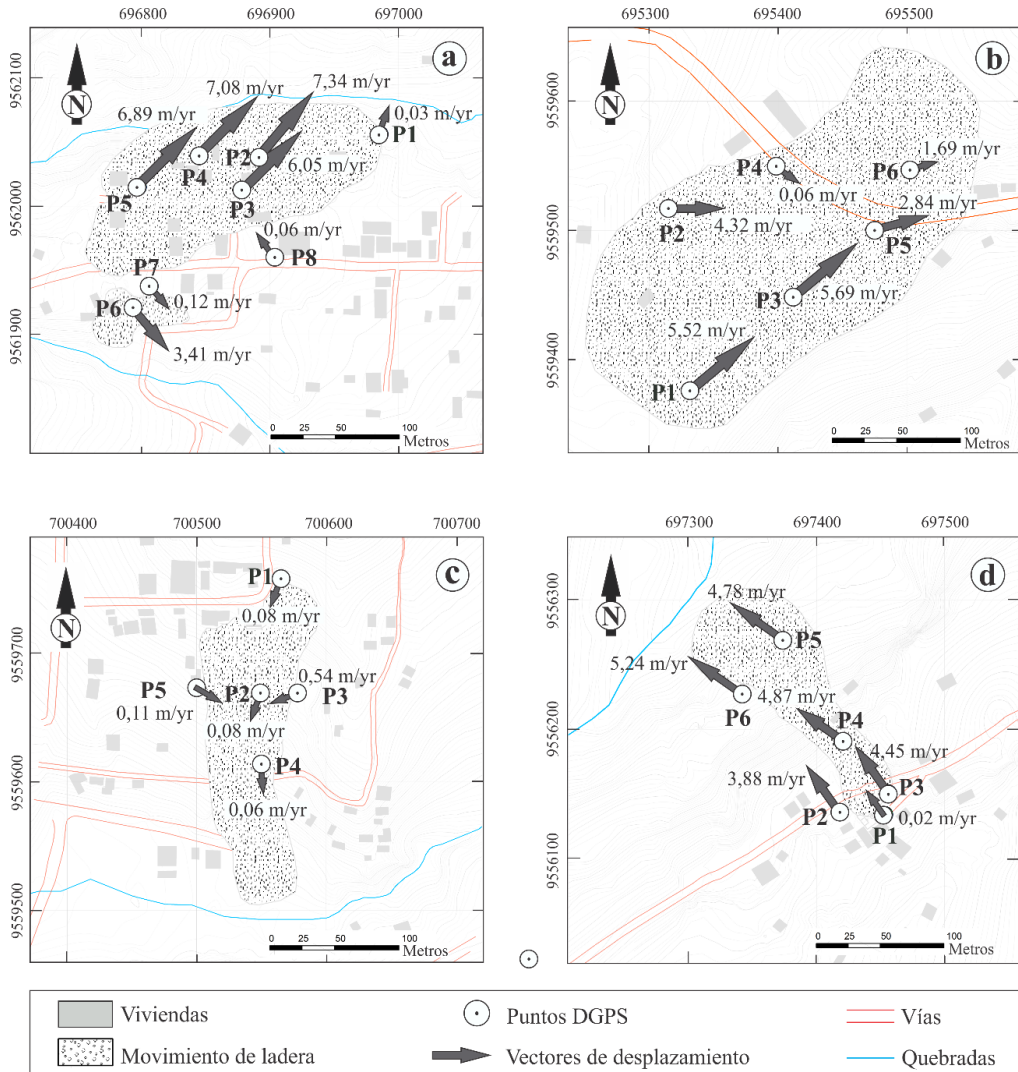


Figura 33. Distribución de vectores indicando la velocidad anual estimada en cada movimiento de ladera a) La Florida b) El Plateado c) San Cayetano d) Chontacruz

Los datos de monitoreo revelan que la magnitud de la deformación se distribuye de forma homogénea en los movimientos de ladera "La Florida", "San Cayetano" y "Chontacruz", pero la deformación en "El Plateado" se concentra a lo largo de su flanco derecho. La dirección y sentido de los movimientos

medidos están en concordancia con las líneas de flujo teóricamente esperadas que se infieren de la morfología de los movimientos de ladera y de la inclinación de su pendiente (Figuras 34, 35, 36). Sin embargo, los datos GPS adquiridos muestran que las tasas de desplazamiento no están vinculadas a la inclinación de la pendiente. Los movimientos de ladera "La Florida" y "El Plateado" muestran pendientes inferiores a los movimientos de "San Cayetano" y "Chontacruz", pero tienen tasas de desplazamiento mayores o similares. La explicación de este fenómeno radica en los materiales involucrados en estos tipos de movimientos de ladera y su grado de saturación de agua. Esto se discutirá en las siguientes secciones que describen los materiales y la mineralogía de las masas movilizadas en detalle.

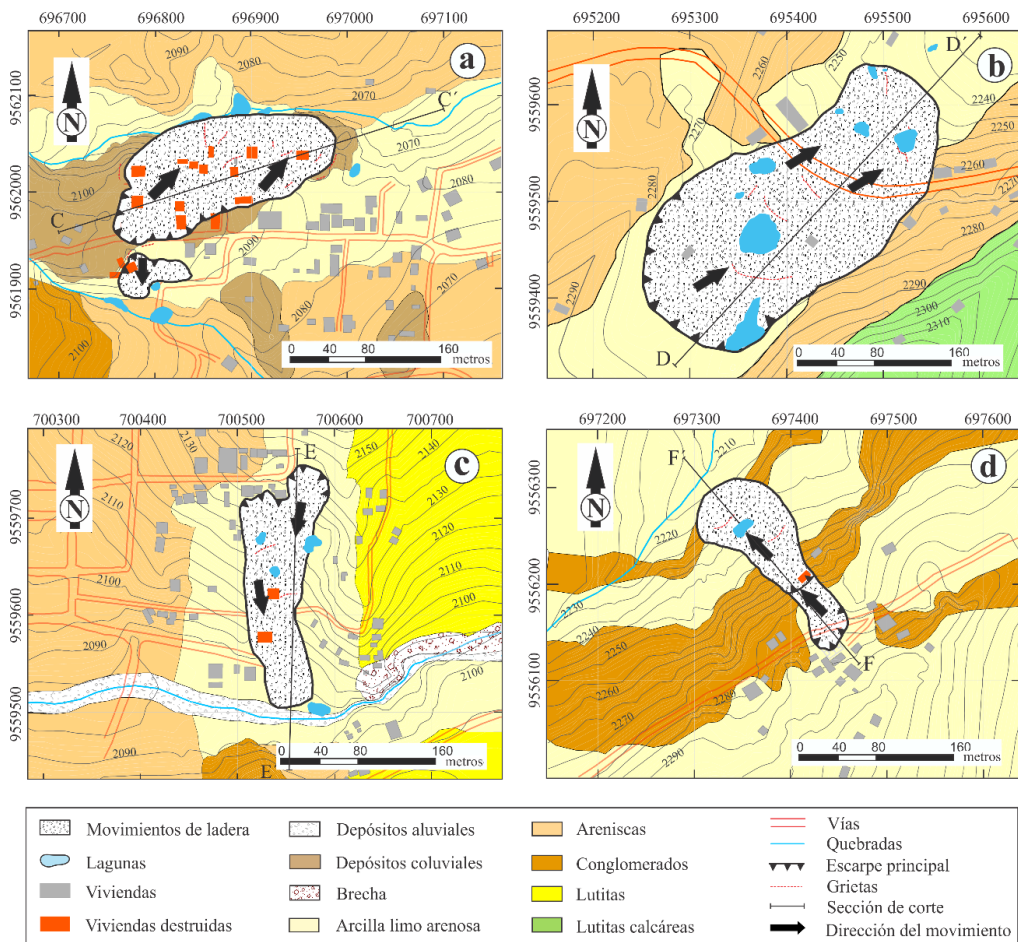


Figura 34. Mapa geológico de los casos estudiados a) La Florida b) El Plateado c) San Cayetano d) Chontacruz.

3.2.3.2 Geometría de los movimientos de ladera

Con los valores de resistividad obtenidos a partir de los perfiles ERT, se puede inferir los niveles de saturación de agua predominantes y obtener los datos estratigráficos (Lapenna et al. 2003) que luego se correlacionan con una buena cartografía de campo para establecer la geometría de los movimientos de ladera (Figura 35). La interpretación de los resultados de la ERT se basó en los valores de resistividad presentados por varios autores (Lapenna et al. 2003; Lapenna et al. 2005; Naudet et al. 2008; Colangelo et al. 2008; de Bari et al. 2011) y observaciones en algunos sectores que nos permitieron identificar los materiales movilizados por la ubicación de las superficies de rotura.

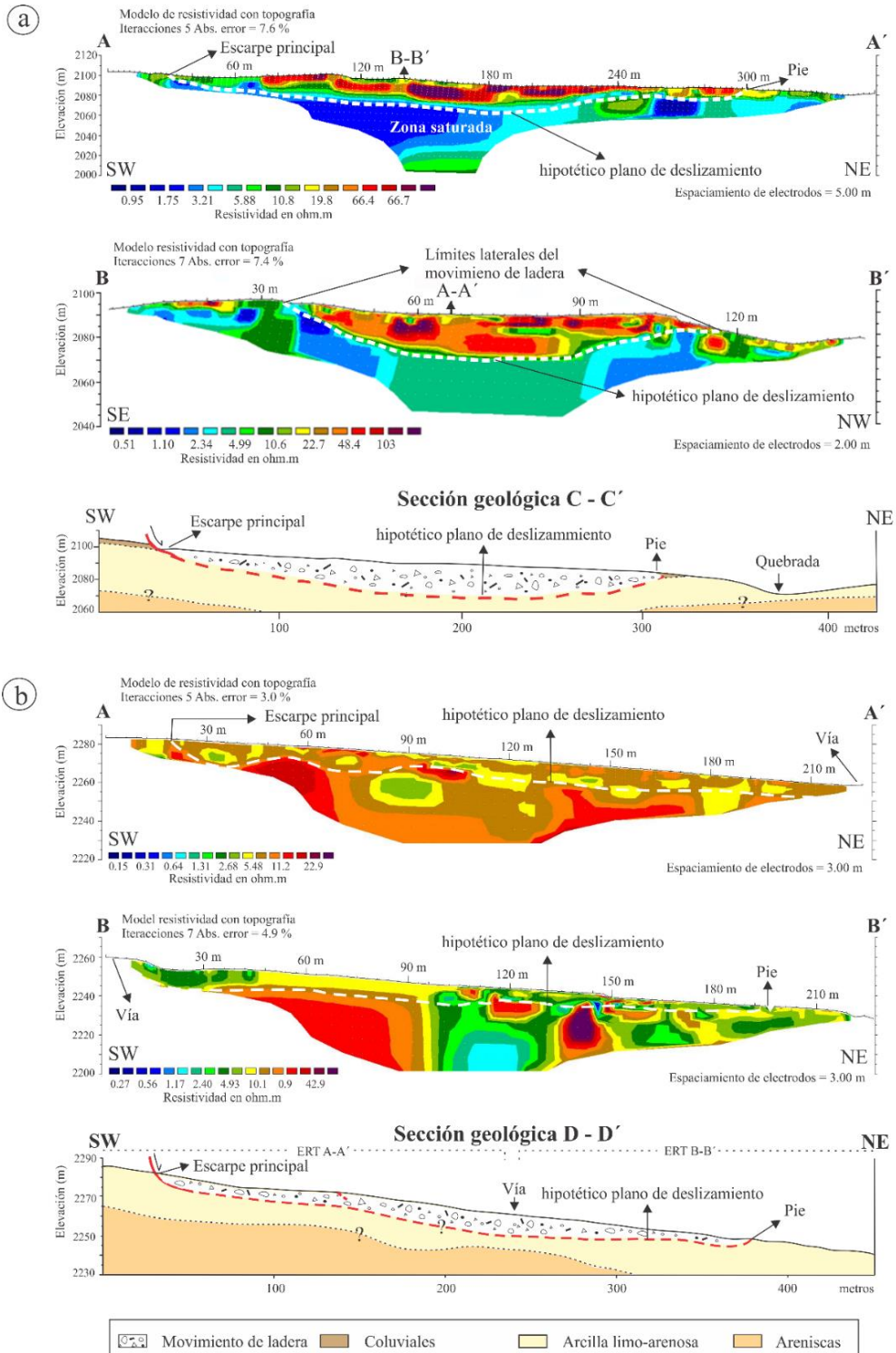


Figure 35. Análisis de los perfiles longitudinales y transversales de la ERT, y su correlación con la sección geológica. a) caso "La Florida", b) caso "El Plateado".

Los perfiles ERT de "La Florida" (Figura 35a) revelan claramente dos zonas diferenciadas: la inferior tiene valores de resistividad menores a $6 \Omega.m$, lo que corresponde a arcillas limo-arenosas saturadas; Y la zona superior, de 20 m de espesor, muestra valores de resistividad en el rango de 6 a $80 \Omega.m$ que corresponde a depósitos coluviales que contienen bloques de rocas metamórficas en una matriz limo-arcillosa. Esta diferenciación no es evidente en el movimiento de ladera "El Plateado", donde no existe un patrón coherente de variación en los valores de resistividad. Las zonas que muestran bajos valores de resistividad ($\sim 10 \Omega.m$) se distribuyen de forma heterogénea a lo largo de los dos perfiles ERT (Figura 35b). En estas zonas, el movimiento de reptación es más activo y nuevas grietas han aparecido en la superficie debido a que el nivel de saturación de agua es muy alto.

El material con los valores de baja resistividad mencionados se ha interpretado como arcillas, arenas y limos arcillosos saturados, mientras que las áreas con valores más altos ($> 22 \Omega.m$) se interpretan como capas consolidadas de arenisca. Sin embargo, aunque los perfiles de ERT no muestran un patrón claro, se puede considerar que existe un plano de rotura a una profundidad de 10 m.

Los perfiles de resistividad eléctrica obtenidos del movimiento de ladera "San Cayetano" y "Chontacruz" muestran una amplia gama de valores de resistividad. De los perfiles ERT, inferimos que el plano deslizante corresponde a un cambio brusco en el patrón de resistividad (Figura 36). En el caso del movimiento de ladera "San Cayetano" los materiales de baja resistividad son atribuibles a areniscas y limos arcillosos, como en los deslizamientos descritos anteriormente. Las zonas de alta resistividad se han atribuido a arcillas arenosas secas ($15-50 \Omega.m$) y areniscas ($> 50 \Omega.m$). Por lo tanto, la profundidad aproximada de este plano de deslizamiento es entre 10 y 15 m (Figura 36c).

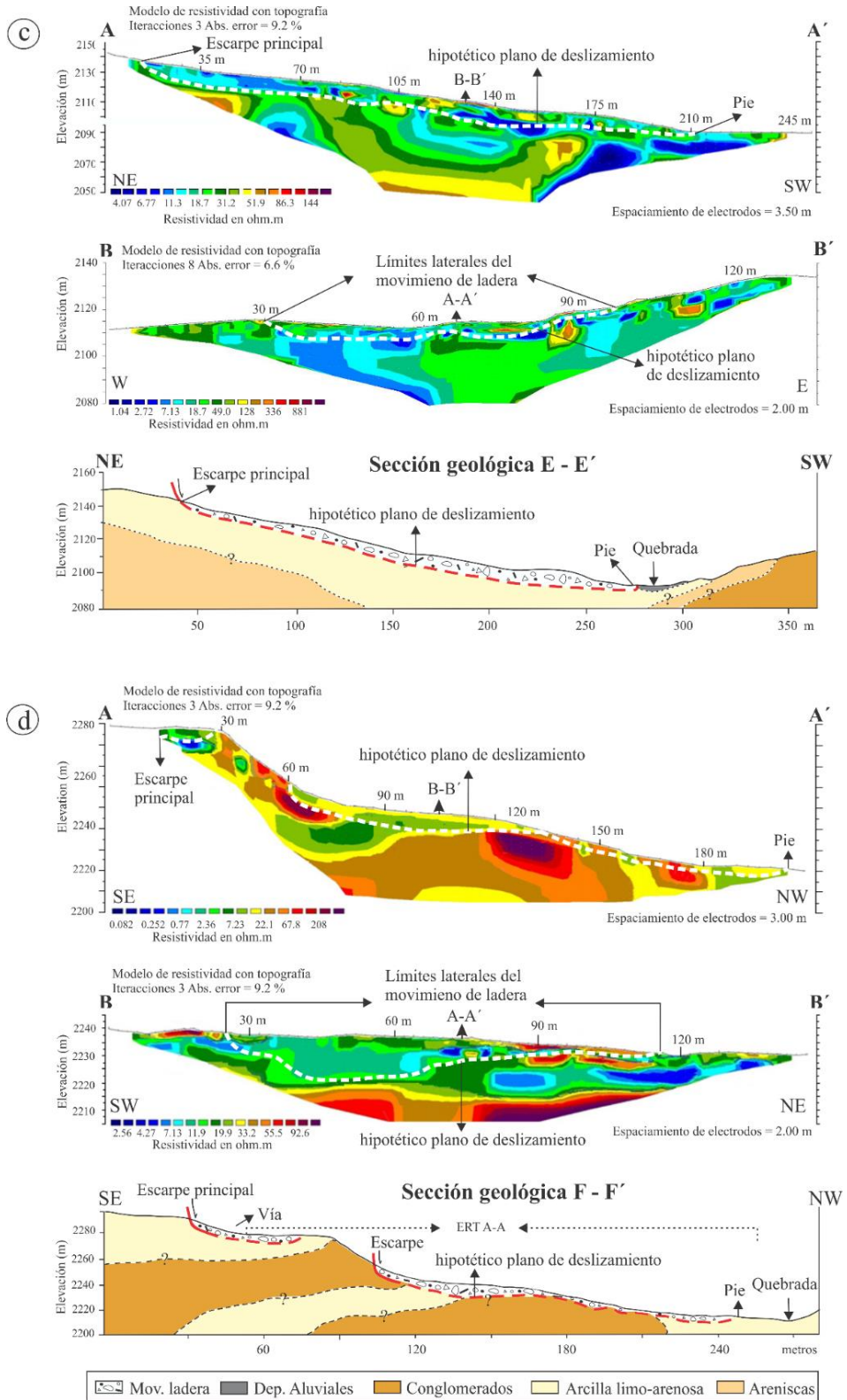


Figure 36. Análisis de los perfiles longitudinales y transversales de la ERT, y su correlación con la sección geológica. a) Caso "San Cayetano", b) caso "Chontacruz".

En el movimiento de ladera "Chontacruz" los valores de resistividad bajos (< a 15 Ω .m) se asume a arenas y limos arcillosos saturados. Los valores de resistividad superiores a 15 Ω .m se atribuyen a Conglomerados de la formación Quillollaco (Figura 36d). El perfil longitudinal de ERT de "Chontacruz" permite visualizar muy bien la estructura interna del movimiento de ladera. La sucesión de capas conglomeráticas y arcillosas en el lecho rocoso puede deducirse de los datos de la ERT, pero el aspecto más interesante es que el perfil muestra claramente que el movimiento comienza en las unidades arcillosas y el material se desliza sobre los conglomerados.

3.2.3.3 Características geotécnicas y mineralógicas de los materiales geológicos involucrados en los movimientos de ladera

La tabla 9 y la figura 37 muestran las principales características geotécnicas de las muestras recogidas de cada movimiento de ladera. Los movimientos de ladera analizados muestran bajos ángulos de fricción interna (16-28°) y ángulos residuales de 8 a 12 °. Los valores más altos están relacionados con la presencia de limos en los materiales involucrados, y los valores más bajos se asocian a materiales que tienen un alto contenido de arcilla. Los resultados de los límites de Atterberg, reflejan que la mayoría de los materiales son suelos de plasticidad media a alta (el Límite Líquido LL y el Índice de Plasticidad IP, varían dentro de los rangos de 40 a 91 y 28 a 58 respectivamente). Los planos de falla de los 4 movimientos de ladera están asociados con capas de arcillas limosas. Estas arcillas son materiales de alta plasticidad (LL: 59-82 e IP: 23-58) y tienen contenido de agua (humedad) muy cerca del límite plástico.

Tabla 9. Propiedades geotécnicas de los materiales involucrados en los planos de los movimientos de ladera.

Características geotécnicas	La Florida	El Plateado	San Cayetano	Chontacruz
Límite líquido	82	72	59	69
Límite plástico	31	29	36	32
Índice de plasticidad	51	43	23	37
Contenido de humedad	24,5%	34,0%	35,2%	37,5%
Índice de consistencia	1,13	0,88	1,03	0,85
Cohesión	157 Kpa	39 Kpa	88 Kpa	127 Kpa
Angulo de fricción interna efectivo	16°	20°	22°	28°
Angulo de fricción interna residual	9°	12°	8°	--
Gravedad específica	1.8	1.9	1.9	1.8
Número de análisis	2	2	2	2

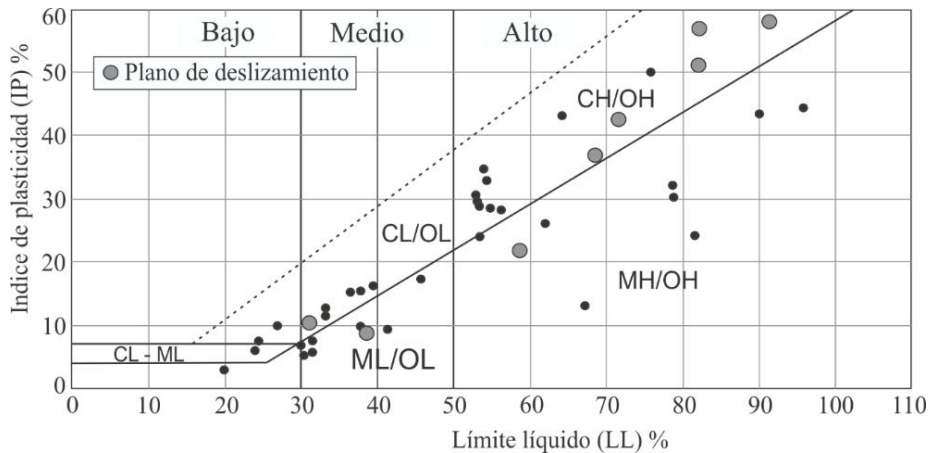


Figura 37. Ubicación de las 44 muestras estudiadas en el gráfico de plasticidad de Casagrande. Los materiales de los planos de falla están representados por círculos grises.

Las superficies de deslizamiento están relacionadas con capas ricas en arcilla con altas concentraciones de minerales arcillosos tipo Esmectita (Figura 38), como se ha observado en otros casos (Azañón et al. 2010; Regmi et al. 2013). La esmectita en esta capa rica en arcilla es principalmente montmorillonita. También se encontraron pequeñas cantidades de otros minerales de arcilla (caolinita e illita) y cuarzo. La montmorillonita es el mineral de arcilla más extenso que pertenece a este grupo. Su alta superficie específica es una consecuencia del tamaño pequeño y la forma plana de los granos de este mineral arcilloso. El débil enlace iónico entre las capas de fililosilicato en la estructura

de la arcilla, debido a la pequeña carga intercapa, permite que la molécula de agua bipolar disuelva los cationes débilmente enlazados en el espacio de la capa intermedia en proporciones que dependen en gran medida de la disponibilidad de agua.

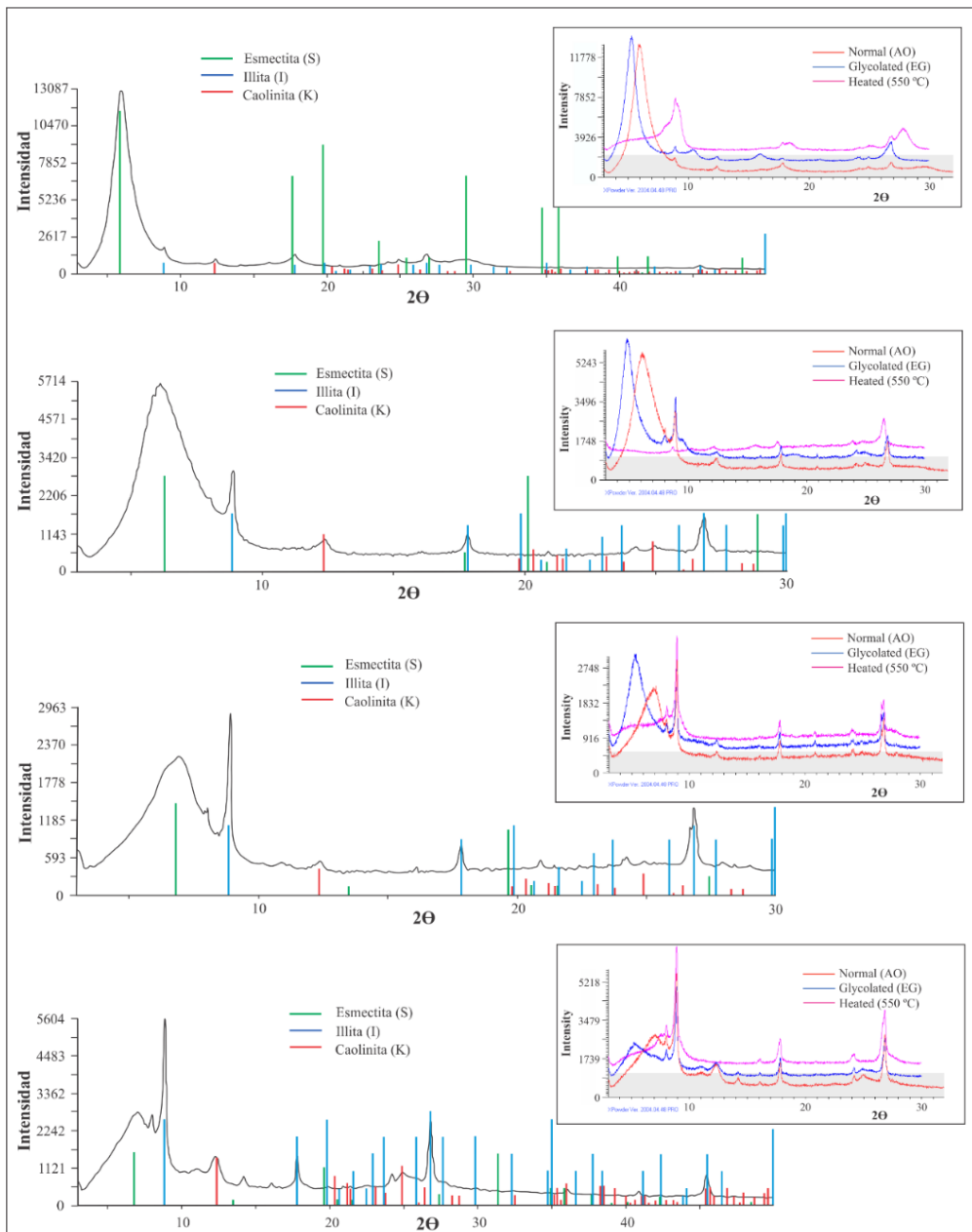


Figure 38. XRD en muestras de arcillas, demuestra que la esmectita es el mineral de arcilla dominante. (Fracción de arcilla de 2- μ m, muestras glycolada y difractogramas de muestras calentadas a 100°C).

En el caso de la montmorillonita, la superficie específica es de aproximadamente 760 m²/g (Yilmaz y Karacan 2002). Por lo tanto, las arcillas con una fuerte componente esmectítica pueden contener importantes cantidades de agua que serían críticas para la estabilidad de la pendiente. Esta alteración de las propiedades físicas contribuye a modificar el comportamiento mecánico de los niveles arcillosos que contienen montmorillonita o cualquier variante del grupo de las esmectitas. Esto puede inducir la formación de superficies de rotura, incluidas en niveles arcillosos, con bajos gradientes de pendiente, como en el caso de otros movimientos de ladera localizados en la cuenca de Loja.

3.2.3.4 Precipitación de los cuatro casos

Considerando la precipitación total del período más lluvioso (Septiembre a Mayo) para cada caso estudio, se puede observar que la menor precipitación que provocó uno de los movimientos de ladera ("Chontacruz") alcanzó aproximadamente el 82% del valor medio al considerar el Registro completo 1964-2014 (Tabla 8). Además, en dos casos ("La Florida" y "San Cayetano") la precipitación acumulada alcanzó casi el 140% del valor medio, mientras que la lluvia acumulada para el caso "El Plateado" fue aproximadamente 14% superior a la media (Tabla 7). Dentro de este período, pueden observarse varios meses durante los cuales la precipitación medida excedió el 150% con respecto al valor promedio; Uno de ellos incluso superó el 200% (Septiembre-2011). La curva que describe el porcentaje de lluvia acumulada con respecto a los valores medios de cada deslizamiento muestra aproximadamente 180% para el primer caso ("La Florida", Figura 32a), aproximadamente 143% para el segundo caso ("San Cayetano", Fig. 32b), el 145% para el tercer caso ("El Plateado", Figura 32c) y el 90% para el último caso ("Chontacruz". Figura 32d).

En resumen, las fechas de los movimientos de ladera indican como ocurrieron anualmente durante 4 años consecutivos. Aunque algunos meses durante el período más lluvioso (septiembre-mayo) superaron el 150% del valor medio, el

porcentaje de precipitación acumulada con respecto a la cantidad media antes de la fecha de cada deslizamiento alcanzó un máximo de sólo 180% en el primer caso, Mientras que los otros tres casos ocurrieron después de superar los valores entre 90% y 145%. Considerando que el porcentaje más bajo (90%) y el valor más alto para 3 de los 4 casos (145%), se espera que la precipitación acumulada durante el período húmedo analizado cercano al valor medio pueda desencadenar deslizamientos con una frecuencia relativamente alta (casi anualmente) en el área de estudio. Se trata de una primera aproximación utilizando sólo cuatro casos.

Un análisis más detallado de los umbrales de lluvia y las probabilidades de ocurrencia de los movimientos de ladera se realizará más adelante en el capítulo de peligrosidad, considerando un mayor número de movimientos de ladera con la datación de su ocurrencia.

3.2.4 Discusión de resultados de los 4 casos estudiados

Estos resultados nos permiten caracterizar en detalle cuatro movimientos de ladera dañinos que han ocurrido en la Cuenca de Loja. Nuestras observaciones pueden servir también de referencia para comprender el mecanismo y la cinemática de los movimientos de ladera observados en esta cuenca y en otros entornos geológicos similares de los Andes. Las mediciones de DGPS y ERT, combinadas con una detallada evaluación geomorfológica, revelan que los movimientos de ladera estudiados son reptación y flujos de tierra complejos que muestran actividad con movimientos comúnmente lentos (cm-m/año) (Hung et al. 2014). Los análisis geotécnicos y mineralógicos demostraron que los minerales arcillosos del grupo de la esmectita han contribuido significativamente al plano de deslizamiento de los movimientos de ladera estudiados. El alto contenido de estos minerales determina cómo el material involucrado en los casos de "La Florida" y "El Plateado" muestra ratios de desplazamiento de hasta m/año en pendientes con gradientes bajos (10-15°). Por

otro lado, movimiento de ladera "San Cayetano" presenta ratios de desplazamiento de cm/año, aunque el gradiente de la pendiente subyacente es de 20°, porque las arcillas activas son menos abundantes en los materiales afectados por el movimiento de ladera. Los desplazamientos observados en el movimiento de ladera "Chontacruz" (4,6 m/año) se explican por el alto gradiente de pendiente (40°).

Aunque es importante para la comprensión de la cinemática de los movimientos de ladera, las caracterizaciones mineralógicas de los materiales involucrados en los movimientos de ladera solamente se han realizado en pocos estudios (Shuzui 2001; Wen et al. 2004; Baoping y Haiyang 2007; Erginal et al. 2009; Regmi et al. 2014; Jiang et al. 2015; Strauhal et al. 2016). En nuestros casos de estudio, gracias a la caracterización mineralógica, hemos comprendido por qué los deslizamientos se desarrollaron en laderas con gradientes bajos (<20 °).

Los altos contenidos de montmorillonita han conferido una plasticidad muy alta a los materiales involucrados en los deslizamientos, haciendo que tengan valores bajos en términos de su cohesión y ángulos de fricción interna. El comportamiento expansivo sustancial de la montmorillonita es incluso intensificado por el clima tropical en el área de estudio. Anteriormente, Ibadango et al. (2005) había determinado, mediante sondeos, que el plano de falla de un movimiento de ladera ubicado a 200 m del movimiento de ladera "Chontacruz" se desarrolló en estratos que contenían arcillas de alta plasticidad. Esta y nuestras observaciones en el área de estudio señalan que es una característica general de la zona.

Los umbrales de precipitación calculados mediante el análisis de series temporales en estos movimientos de ladera, son consistentes con las observaciones mencionadas anteriormente. Las precipitaciones no muy lejos de la media pueden desencadenar o reactivar estos deslizamientos. Esto representa

una situación problemática con respecto a los movimientos de ladera en el Valle de Loja y a otras cuencas Neógenas Andinas, debido a que estas áreas presentan abundantes lluvias y altos niveles de humedad relativa. Estas características explican el gran número de movimientos de ladera inventariados en el Valle de Loja que repetidamente causan daños a la infraestructura y áreas urbanas. Por lo tanto, la producción de un mapa de amenaza a movimientos de ladera en estas zonas debe ser una prioridad para que sirva de soporte a la planificación urbana futura. Así, los resultados de este estudio han servido de base para el análisis de susceptibilidad que se describe en el capítulo IV.

3.2.5 Conclusiones de la caracterización de los cuatro casos

Este estudio exhaustivo de cuatro movimientos de ladera que han ocurrido en Loja (Ecuador) ha servido para formular un modelo conceptual detallado de los deslizamientos de tierras comunes que ocurren en esta área. Estos deslizamientos de tierra son movimientos de ladera lentos. Sin embargo, según las mediciones DGPS, tres de ellas muestran velocidades considerables con respecto a su potencial de daño (alrededor de ~3-7 m/año). Aunque los tamaños de los deslizamientos de tierra pueden considerarse moderados, los movimientos analizados son principalmente superficiales, como muestran los perfiles de ERT. Los análisis geotécnicos y mineralógicos demuestran que el principal factor causal es la presencia de minerales arcillosos activos en las formaciones geológicas involucradas. Estas arcillas explican por qué las pendientes de bajo gradiente fallaron después de períodos de precipitación que no fueron excepcionalmente intensivos.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE MOVIMIENTOS DE LADERA

La susceptibilidad frente a los movimientos de ladera expresa en forma espacial, la mayor o menor tendencia del terreno a la generación de movimientos de ladera. Es la condición general de estabilidad del terreno (Brabb et al. 1972; Chacón et al. 1993; Irigaray 1995). El análisis de susceptibilidad consiste en realizar un análisis comparativo (cualitativo o cuantitativo) de factores condicionantes o desencadenantes con los movimientos de ladera que han ocurrido en el pasado. La susceptibilidad no considera el factor tiempo.

Siendo el objetivo de este apartado el análisis de la susceptibilidad, es importante primero describir los factores condicionantes. Se entiende por factores condicionantes, causales o determinantes aquellos cuya presencia, ausencia o la forma en que se presentan, condicionan que una ladera o porción de esta sea susceptible a los movimientos de ladera. La combinación de los factores determina la relación entre las fuerzas resistentes y activadoras de la inestabilidad, de tal forma que un balance favorable a las primeras es característico de la condición de equilibrio estable, mientras que un balance favorable a las segundas, conducirá a la ladera a una situación inestable.

Entre los factores condicionantes algunos dependen de la naturaleza de los materiales (litología, estructura, discontinuidades, etc.) o de la morfología del terreno (pendiente, relieve, altitud, curvatura, etc.). Debiéndose además considerar otros factores como, el uso del suelo, orientación, etc., que pueden influenciar en la estabilidad de las laderas. Por tanto, para este estudio se generaron 14 mapas temáticos que representan factores condicionantes de los deslizamientos estudiados, de los cuales se indican sus principales características a continuación.

4.1 ELABORACIÓN DE BASE DE DATOS DE FACTORES CONDICIONANTES

Los mapas de factores condicionantes se han dividido en dos grupos principales: a) mapas de variables derivadas del Modelo Digital del Terreno (MDT) y b) mapas temáticos.

4.1.1 Mapas de variables derivadas del MDT

El Modelo Digital del Terreno (MDT), en el entorno de los Sistemas de Información Geográfica, es la fuente de información principal para la descripción y análisis cuantitativo del medio físico. Un modelo digital del terreno es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua (Felicísimo 1994). Los diferentes componentes del MDT (Felicísimo 1994; Borrough 1988; Bosque 1992) tales como el propio Modelo Digital de Elevaciones (MDE) y los modelos derivados (pendientes, orientación, etc.) pueden constituir en factores condicionantes de la estabilidad. Estos componentes del MDT proceden en realidad del MDE y se obtienen de forma directa, generalmente mediante la aplicación del análisis de vecindad o utilizando otras funciones de clasificación y superposición de mapas (Felicísimo 1994; Fernández 2001).

4.1.1.1 Mapa de altitud

La altitud no es el factor determinante más empleado, pero sí de uso común en trabajos en zonas montañosas con fuertes desniveles (Fernández 2001). Este mapa consiste en una reclasificación del MDE, que es una superficie “ráster” continua y la convertimos en discreta mediante la reclasificación. La clasificación por intervalos del MDE se ha realizado a cada 100 metros de altitud, que se considera representativa para la escala de trabajo (Figura 39). A excepción del primer intervalo que abarca desde la altura inferior de la zona de

estudio 1.979 a 2.000 msnm y el último que corresponde desde 2.600 a 2.642 msnm altura superior de la zona de estudio.

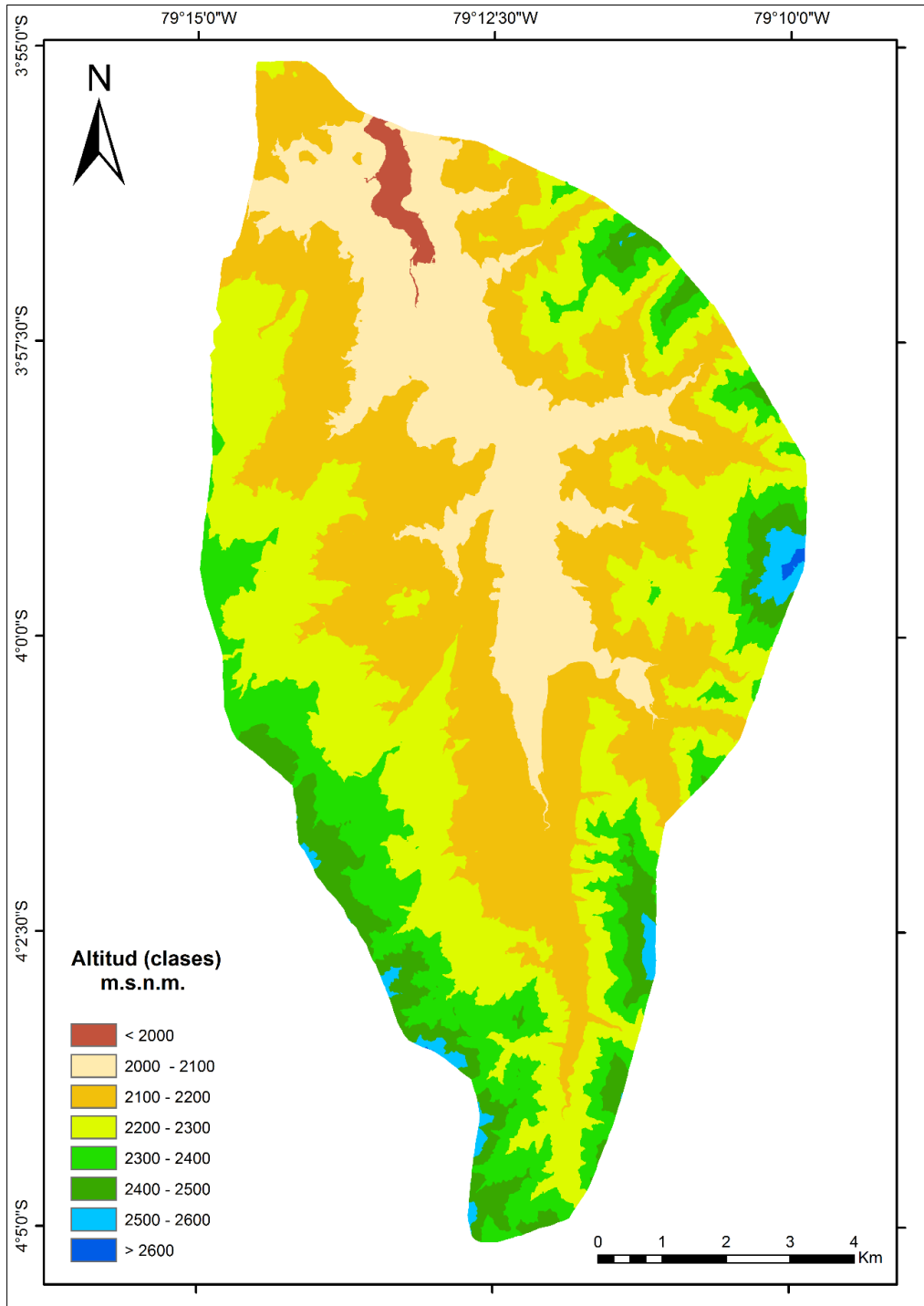


Figura 39. Mapa de altitudes

La figura 40, muestra la distribución areal expresada en porcentaje según cada intervalo de altitud considerado. El tramo más representado, con un 33,9 % es el comprendido entre 2.100 y 2.200 msnm. Mientras que la figura 41 evidencia que el mayor porcentaje de área movilizada por los movimientos de ladera está en el rango de 2100 a 2200 msnm con un 37,2% y en el rango de 2.200 a 2.300 msnm con el 32%.

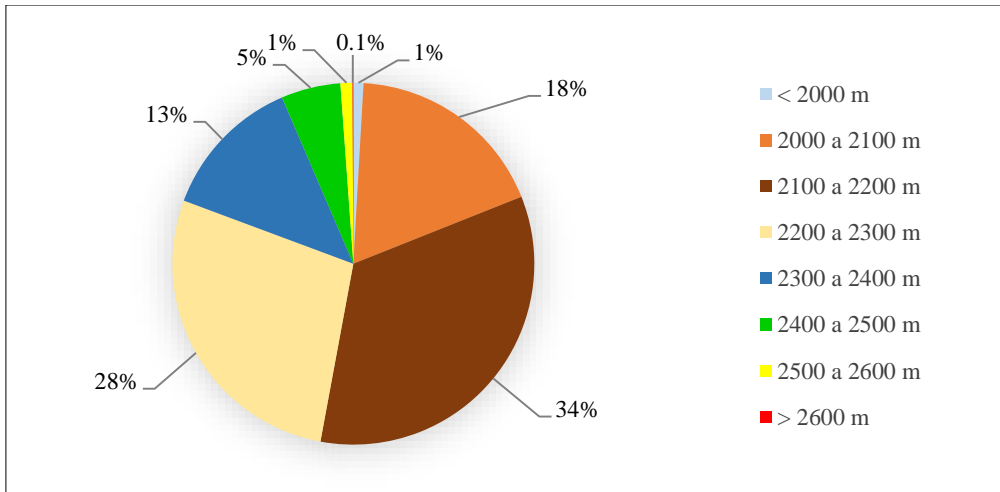


Figura 40. Distribución porcentual de los intervalos de altitud considerados.

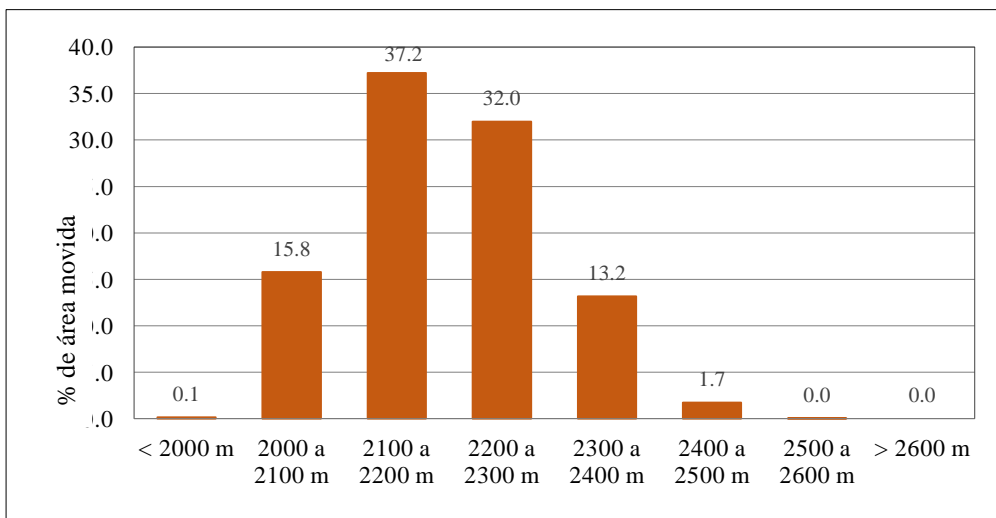


Figura 41. Distribución porcentual de área movida por intervalos de altitud.

4.1.1.2 Mapa de pendientes

La pendiente, es el gradiente de inclinación de la línea de máxima pendiente tangente al terreno en un punto respecto a la horizontal. Se suele expresar en porcentaje y en grados sexagesimales.

A partir de un modelo de pendientes continuo se realizó la reclasificación del mismo. Las clases obtenidas para el presente trabajo son: 0-5°; 5-10°; 10-20°; 20-35°; 35-60°; y >60°. Con estas clases se elaboró el mapa de pendientes de la zona (Figura 42). La figura 43 muestra la distribución areal expresada en porcentaje por cada intervalo de pendiente considerado. La principal característica de la zona es que el 54,7 % del terreno presenta una pendiente entre 10° y 35°, por tanto la de mayor predominio. El 36,2 % está ocupado por pendientes de 0° a 10° y el 9,2 % tiene pendientes mayores de 35°. La figura 44 indica que el mayor porcentaje de área deslizada está en el rango de 10 a 20° de pendiente con el 35%, seguido del rango de 5 a 10° con el 25,1% y luego el rango de 20 a 30° con el 20,4%.

Con la variable pendiente generalmente sucede que cuanto mayor es la pendiente mayor debería ser la susceptibilidad a la generación de movimientos de ladera. Sin embargo se observa que a partir de los 60° no se generan movimientos de ladera (al menos de los estudiados en este trabajo), quizá debido a que la pendiente es demasiado empinada para retener la formación superficial. Por lo que en estas partes empinadas solo afloraría el substrato rocoso de rocas metamórficas que es fuente de desprendimientos pero no del tipo de movimientos analizados en este estudio.

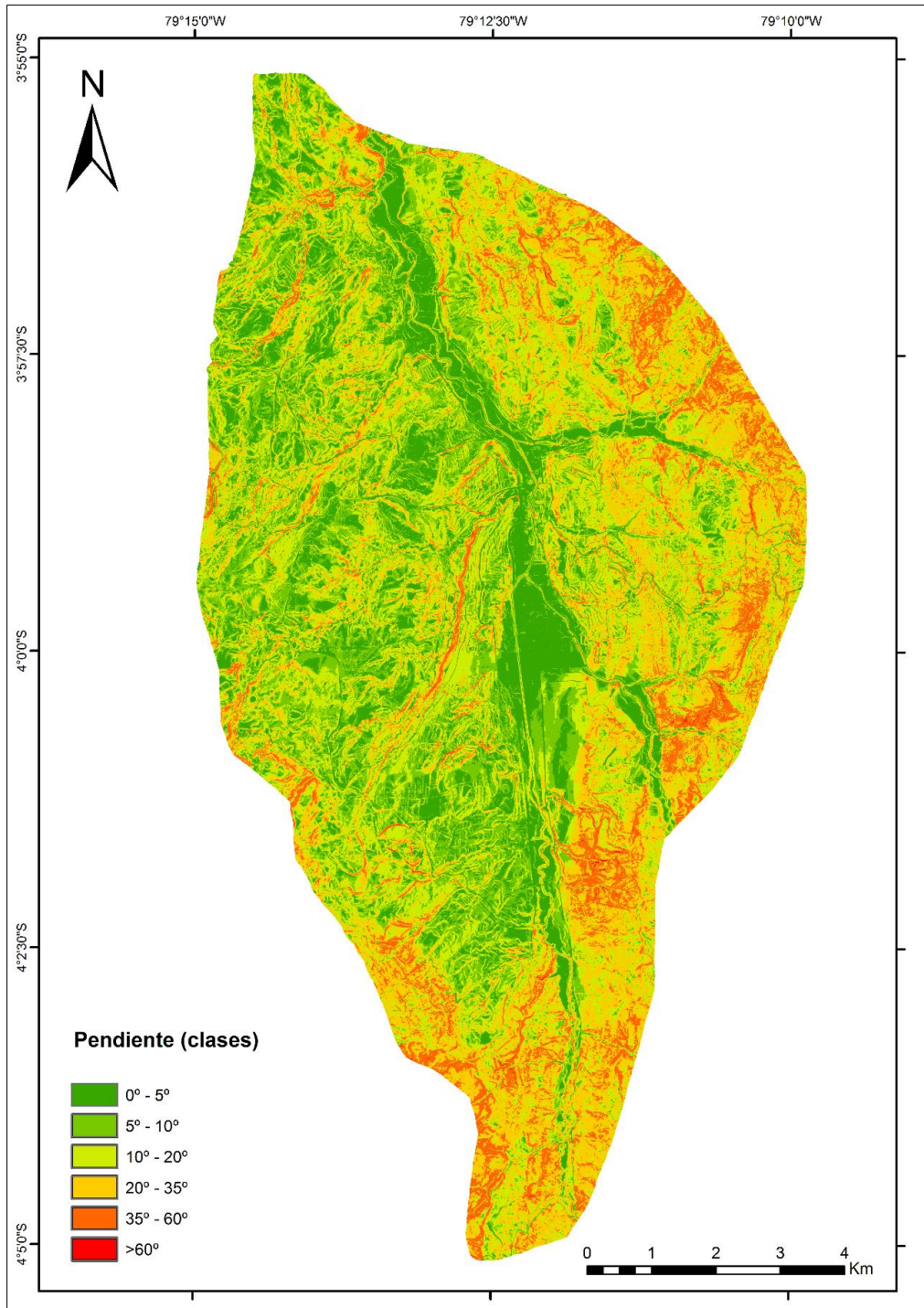


Figura 42. Mapa de pendientes

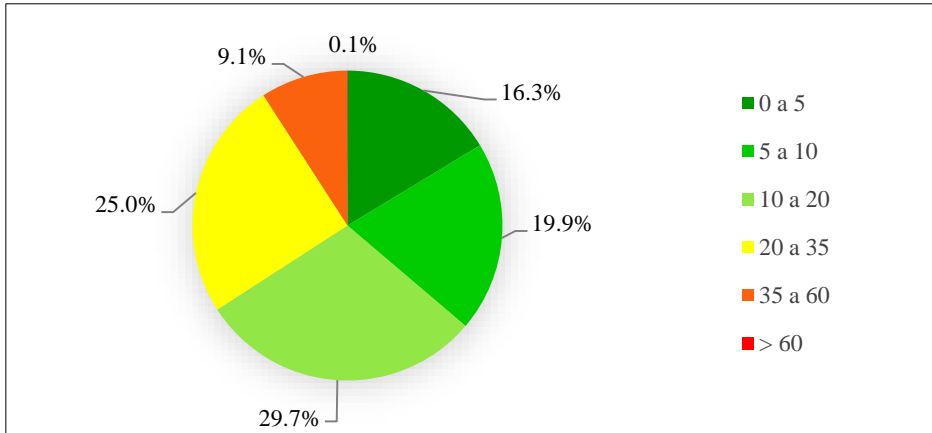


Figura 43. Distribución porcentual de área, según los rangos de pendientes considerados.

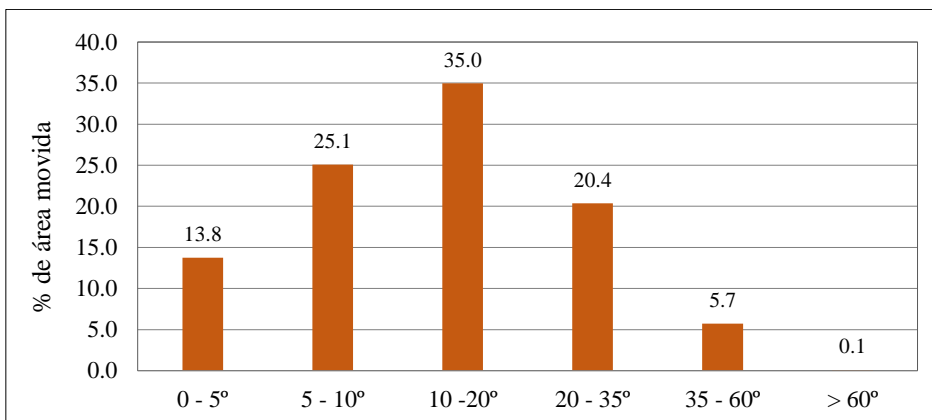


Figura 44. Distribución porcentual de área movida por intervalos de pendiente.

4.1.1.3 Mapa de orientaciones

La orientación es el ángulo que forma la línea de máxima pendiente de un elemento de la superficie del terreno con respecto al Norte geográfico, medido en sentido de las agujas del reloj. La exposición constituye, junto con la pendiente y la litología, uno de los factores determinantes más utilizados en el análisis de estabilidad a gran escala (DeGraff y Romesburg 1980; Carrara 1983; Pec 1988), es decir, indica de manera indirecta la situación de una ladera en cuanto a su insolación y, por lo tanto, si una ladera se encuentra húmeda o seca con mayor frecuencia. Los valores de orientación se expresan en grados positivos ($^{\circ}$), y pueden variar de 0 a 360 $^{\circ}$. En este análisis se considera las

orientaciones: Plana, Norte (315° a 360°), Sur (135° a 225°), la Este (45 a 135°) y orientación Oeste (225° a 315°). Con estas 5 clases se ha generado el mapa de exposición (Figura 45).

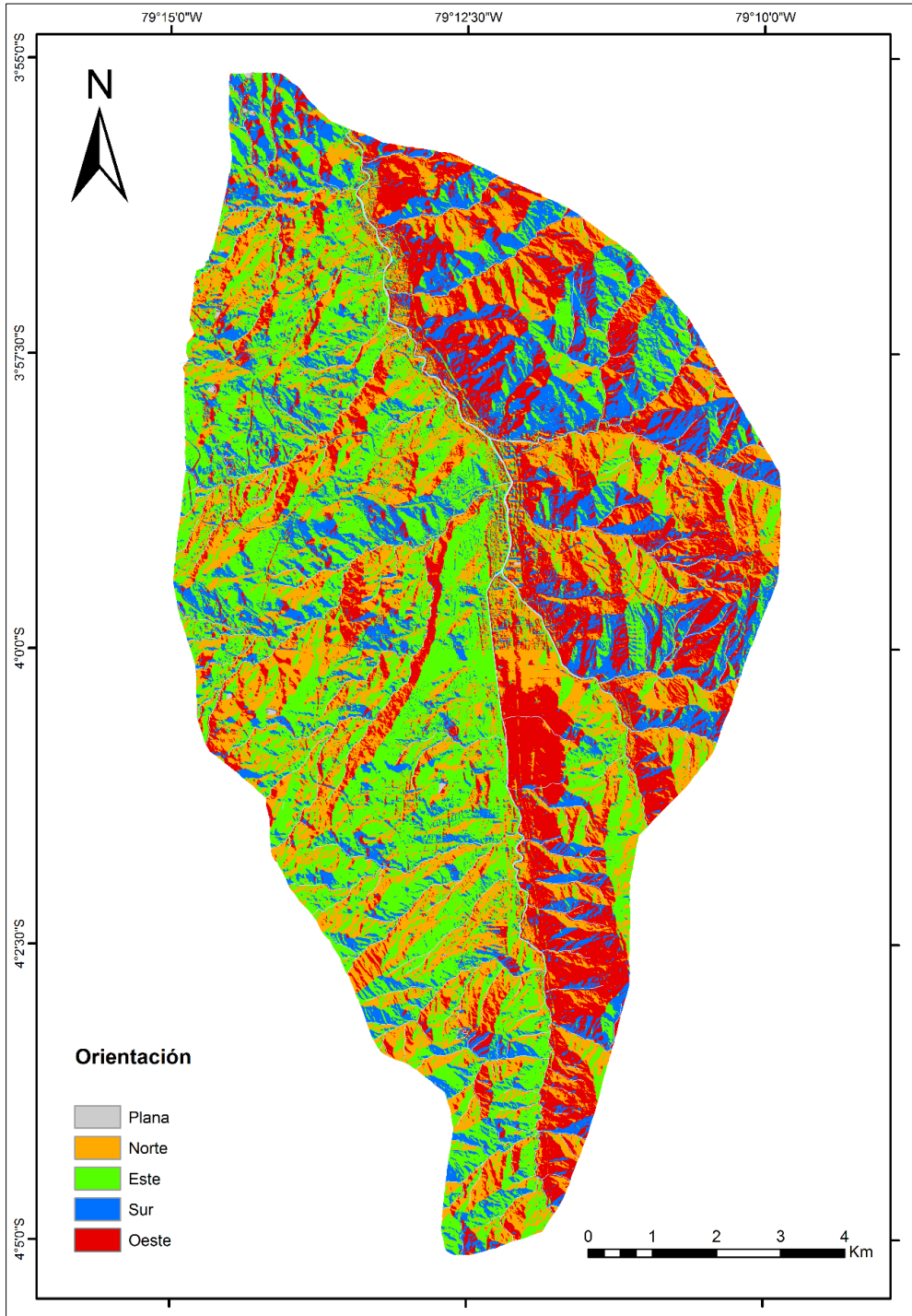


Figura 45. Mapa de orientación

La figura 46 muestra la distribución areal expresada en porcentaje por cada intervalo de orientación considerado. Esta indica una representatividad nula de la orientación plana, concordante con las altas pendientes de la zona. Destaca la orientación hacia el Oeste y Este con el 36,4 y 31,1 % respectivamente. En la figura 47 se aprecia que el movimiento del terreno se da principalmente en zonas con orientación hacia el sur con un 34,7% y hacia el oeste con el 30,9%.

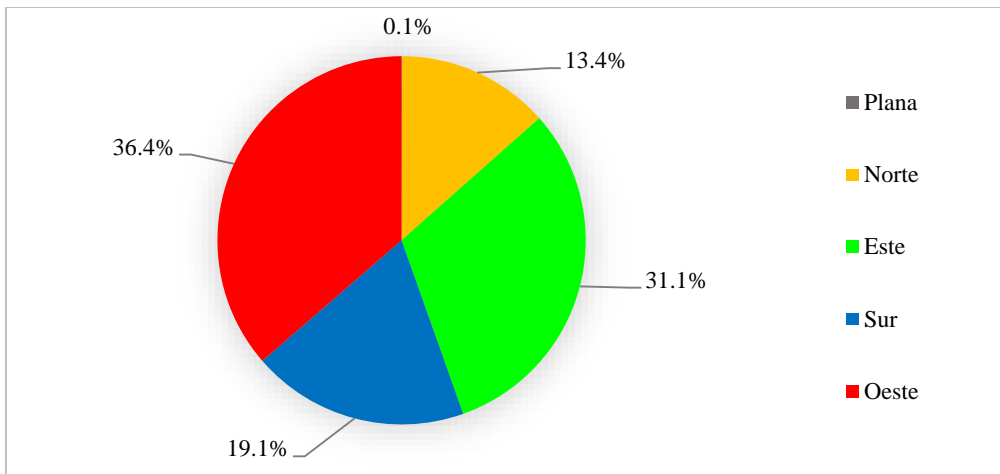


Figura 46. Distribución de las áreas de orientación en porcentaje

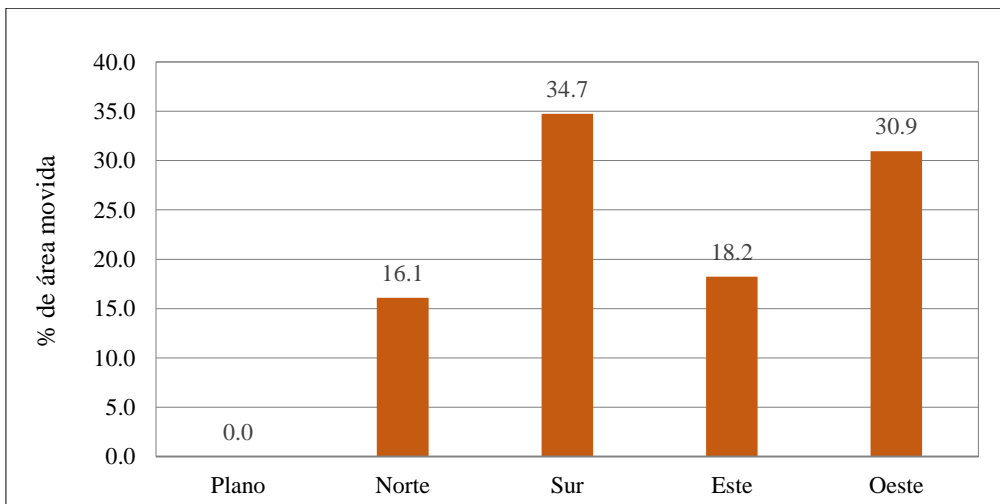


Figura 47. Distribución porcentual de área movida por tipo de orientación.

4.1.1.4 Mapa de curvaturas

La curvatura expresa la forma o la curvatura de la superficie del terreno. Una parte de la superficie puede ser cóncava o convexa. Es fácil de comprobar consultando el valor de la curvatura. Valores positivos describen la curvatura convexa, valores negativos la curvatura cóncava, valores cercanos a cero indican que la zona es plana o de pendiente rectilínea (La pendiente rectilínea equivale a una forma del relieve ligeramente plano donde el gradiente es inferior al 3%, según las especificaciones técnicas del IGAC (2010a)). La curvatura se obtiene calculando la derivada segunda de la superficie, o la pendiente de la pendiente.

El parámetro de curvatura se puede utilizar para describir las características físicas de una cuenca de drenaje para intentar entender los procesos de erosión (patrones de erosión) y escorrentía. En el caso de análisis de la peligrosidad a los movimientos de ladera, la curvatura es muy interesante por cuanto permite visualizar áreas que potencialmente pueden ser inestables ante los movimientos de ladera (áreas cóncavas o planas). Existen tres opciones para el tipo de curvatura: Perfil, Plano y Estándar.

Nota:

Las unidades del ráster de salida de la curvatura son una centésima parte (1/100) de una unidad **z**. Los valores razonablemente esperados para un ráster de curvatura de un área accidentada (relieve moderado) pueden variar de -0,5 a 0,5; mientras que para montañas empinadas y escarpadas (relieve extremo), los valores pueden variar entre -4 y 4.

Perfil: *La curvatura de perfil* determina el grado de convexidad o concavidad de la superficie en la dirección de máxima pendiente (longitudinal) (Santacana 2001). Un valor negativo (Figura 48A) indica que la superficie es convexa hacia arriba en esa celda y la corriente se desacelerará. Un perfil positivo (Figura 48B) indica que la superficie es cóncava hacia arriba en esa celda y la corriente se acelerará. Un valor de cero indica que la superficie es lineal o planar (Figura 48C). Esta variable permite analizar la eficiencia de la topografía para

concentrar o dispersar la mayor cantidad de agua de lluvia en un punto determinado de la ladera. Se relaciona directamente con la infiltración y la escorrentía a través de la aceleración y desaceleración de las corrientes por la superficie, influyendo en la erosión y deposición.

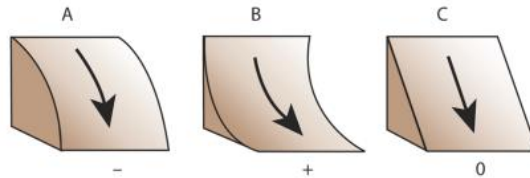


Figura 48. Esquemas de Curvatura del perfil

Plano: La curvatura del plano es perpendicular a la dirección de la pendiente máxima. Es decir hace referencia a la concavidad o convexidad transversal de la ladera, y se relaciona con la convergencia y divergencia de la corriente por una superficie. Un valor positivo (Figura 49A) indica que la superficie es lateralmente convexa en esa celda. Un plano negativo (Figura 49B) indica que la superficie es lateralmente cóncava en esa celda. Un valor de cero indica que la superficie es plana o lineal (Figura 49C).

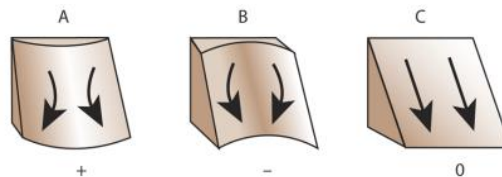


Figura 49. Esquemas de Curvatura de plano

Estandar: La curvatura estándar **combina** tanto curvaturas de perfil como de plano. La curvatura del perfil afecta la aceleración y desaceleración del flujo y, por lo tanto, influye en la erosión y la sedimentación. La curvatura del plano influye en la convergencia y divergencia del flujo. Si se tienen en cuenta tanto la curvatura de plano como de perfil conjuntamente es posible comprender con más exactitud la corriente por una superficie.

En la figura 50 las columnas muestran las curvas del plano y las filas la curva del perfil. Las columnas del plano son positivas, negativas y 0, orientadas de izquierda a derecha. Las curvas de perfil son negativas, positivas y 0, orientadas de arriba a abajo.

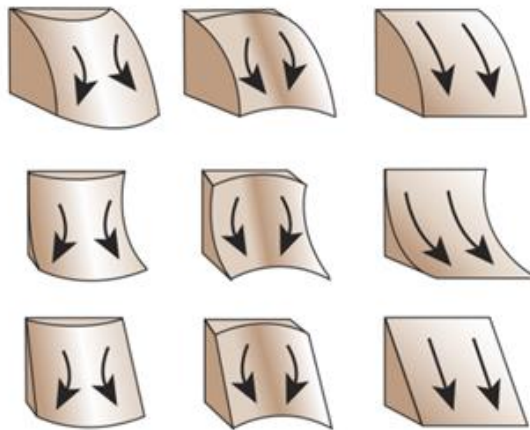


Figura 50. Esquemas de Curvatura estándar (Genera curvaturas de perfil y de plano)

En definitiva este tipo de curvatura indica el grado de Convexidad/Concavidad del terreno. La variable se relaciona con los movimientos de ladera en la medida en que indica el grado de concentración o dispersión del drenaje superficial. Son las zonas cóncavas en las cuales el flujo se concentra hacia la celda mientras que se dispersa en las convexas. Por tanto en las cóncavas cabría esperar un aumento en la presión de agua de los poros y una mayor acumulación de formación superficial que favorecería a la inestabilidad de las laderas. La curvatura cóncava es muy eficiente en la captación de aguas de lluvia (Carrara 1983; Oyagi 1984; Smith 1988; Gao 1993). Las figuras 51, 52 y 53 muestran los mapas generados por cada tipo de curvatura: de perfil, de plano y estándar respectivamente.

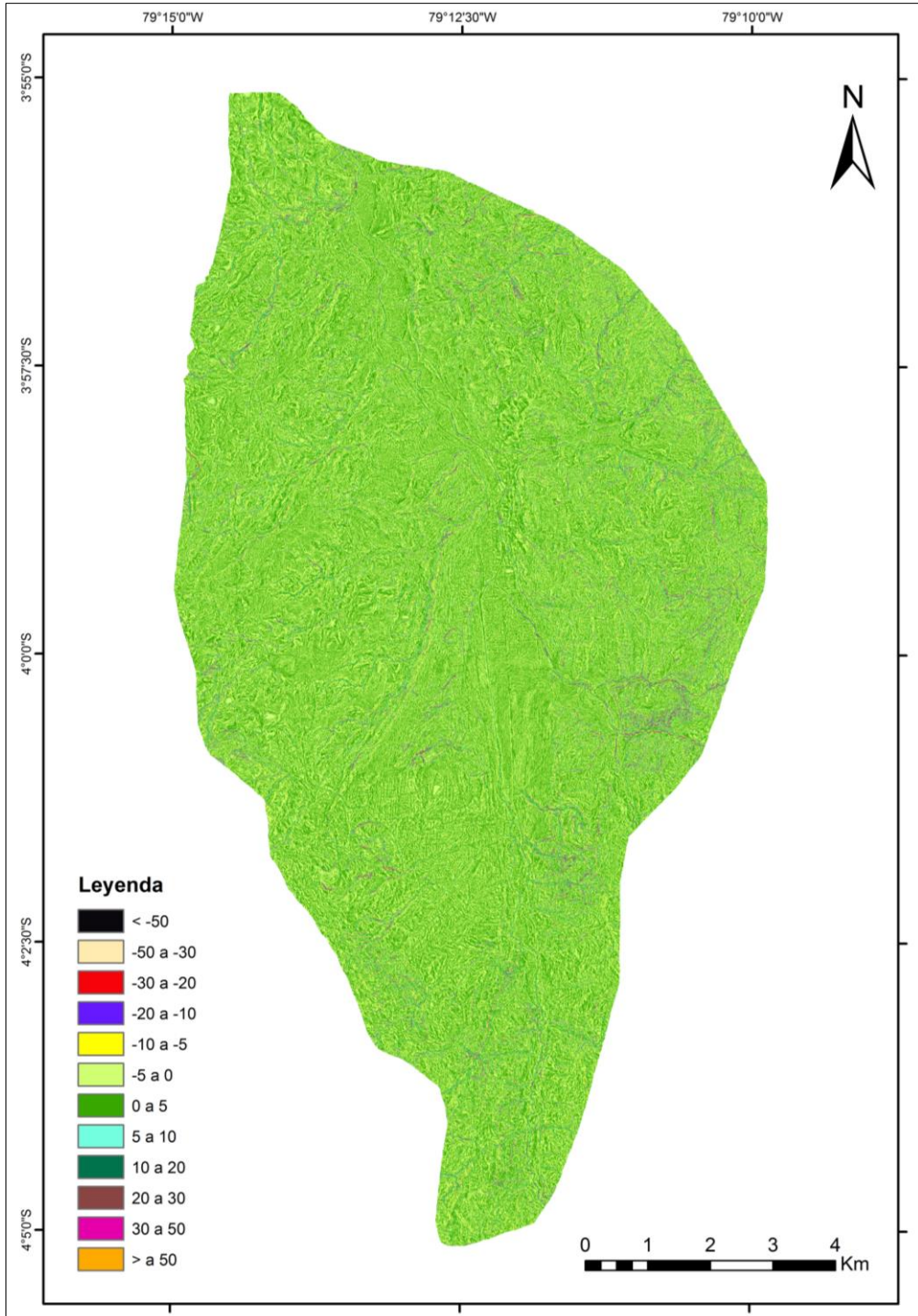


Figura 51. Mapa de curvatura de perfil (según la dirección de máxima pendiente)

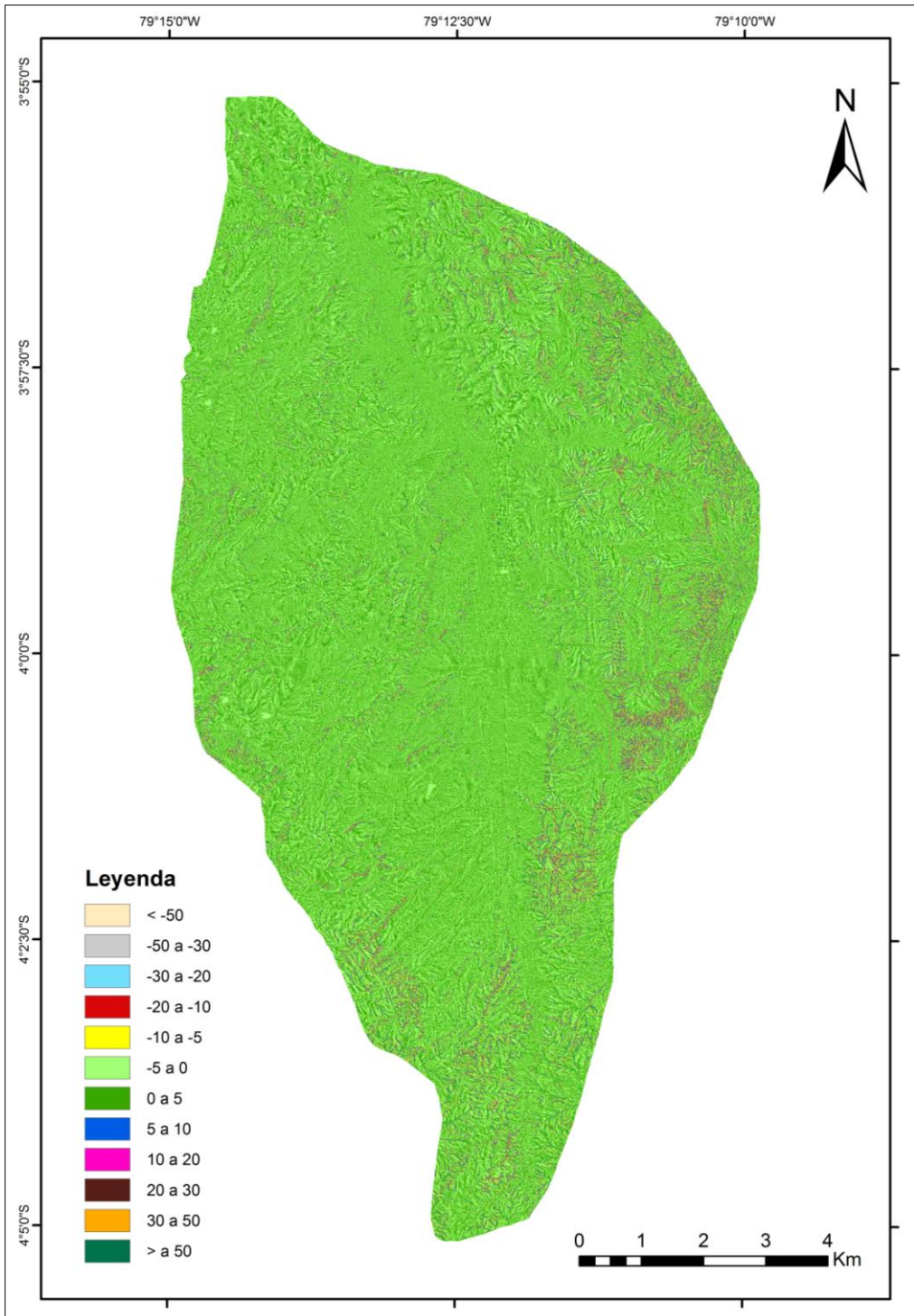


Figura 52. Mapa de curvatura plana (Perpendicular a la dirección de máxima pendiente)

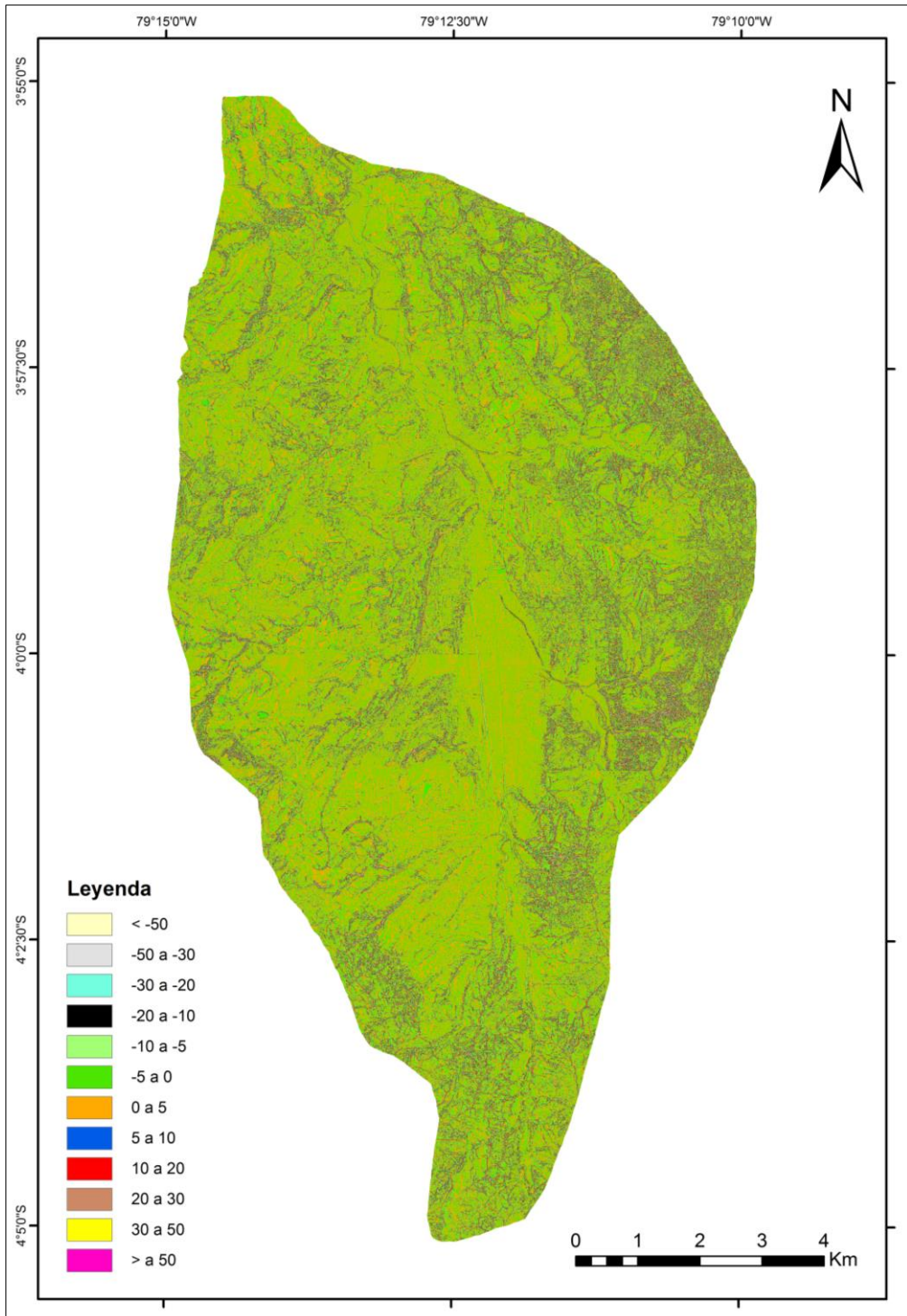


Figura 53. Mapa de curvatura estandar

La figura 54 representa el porcentaje de área distribuido por rango de curvatura (considerando los tres tipos de curvatura: perfil, plana y estándar), la misma que indica que la mayor cantidad de área se encuentra distribuida en el rango de curvaturas -5 a 5, con un porcentaje de 38 a 46% para los tres tipos de curvatura. Mientras que la figura 55 evidencia que igualmente la mayor cantidad de área movida se concentra en esos mismos rangos de curvatura con porcentajes similares entre 36 a 48%. Esto nos indica que existe una distribución normal y la curvatura entre valores de 5 a -5.

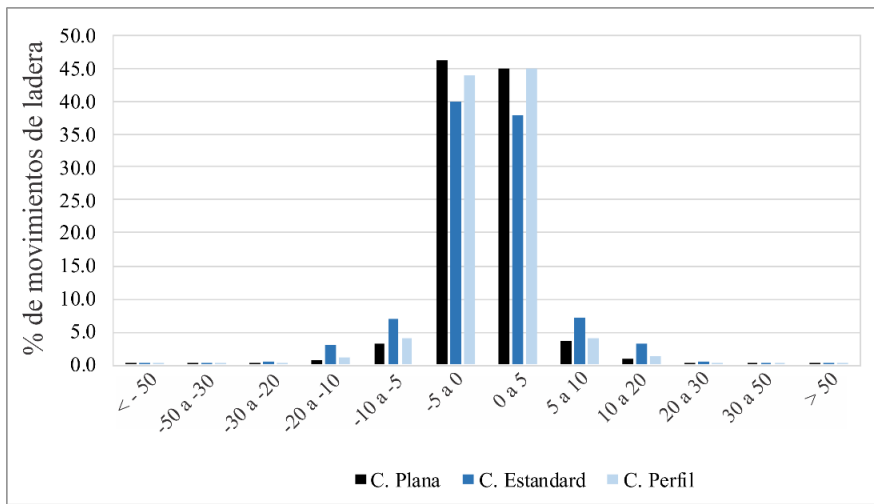


Figura 54. Porcentaje de área por rango de curvatura

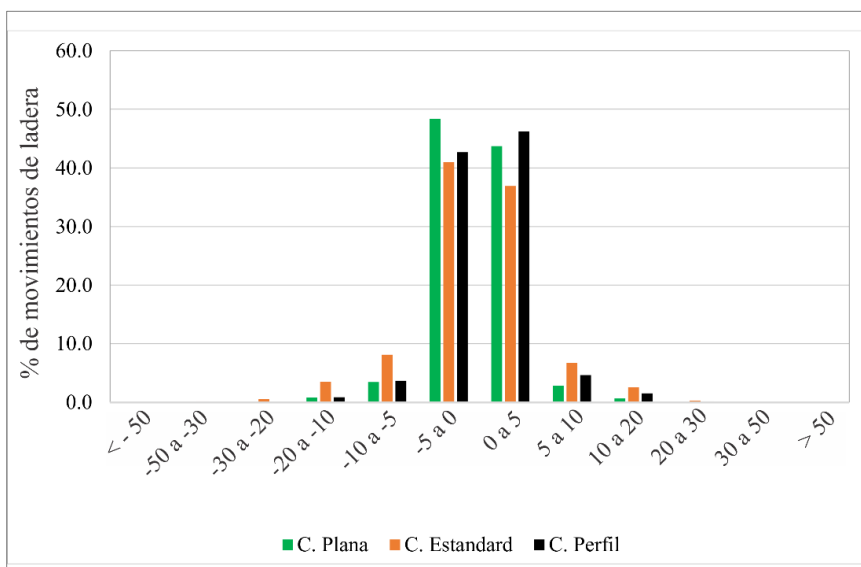


Figura 55. Porcentaje de área movida por rango de curvatura

4.1.1.5 Mapa de distancia a la red de drenaje

Las operaciones de distancia, conocidas como procesos de creación de áreas de proximidad, amortiguamiento o también procesos de *buffering*, se utilizan para marcar una zona alrededor de la entidad inicial donde los límites de la zona o *buffer* se encuentra a una distancia D de las coordenadas de la entidad original.

En este estudio se genera un mapa de distancia a la red de drenaje, que consiste básicamente en definir zonas de influencia de la red de drenaje a la inestabilidad de las laderas. Para ello se ha establecido 5 rangos de diferentes distancias a la red de drenaje (Figura 56). La figura 57 muestra que la mayor cantidad de área se concentra en el rango de distancia a la red de drenaje de 200 a 500 m con un 33%, seguido del rango de 100 a 200 m con un porcentaje de 25%. Mientras que la figura 58 refleja que la mayor cantidad de área movida está en el rango de 200 a 500 m con un porcentaje de 29,7% que igualmente es el que ocupa mayor área de terreno, luego está el rango de 0 a 50 m con un 25,8% área movida.

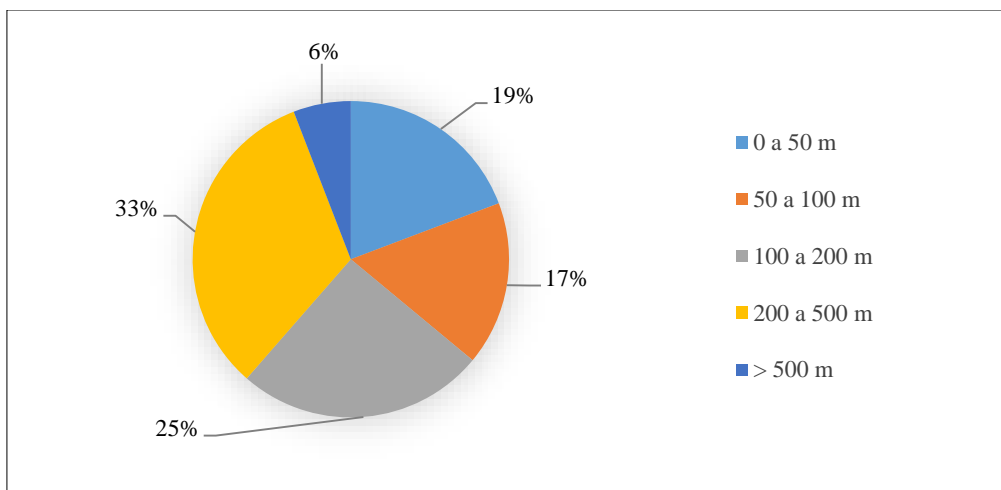


Figura 57. Distribución porcentual de área en cada clase de distancia a la red de drenaje.

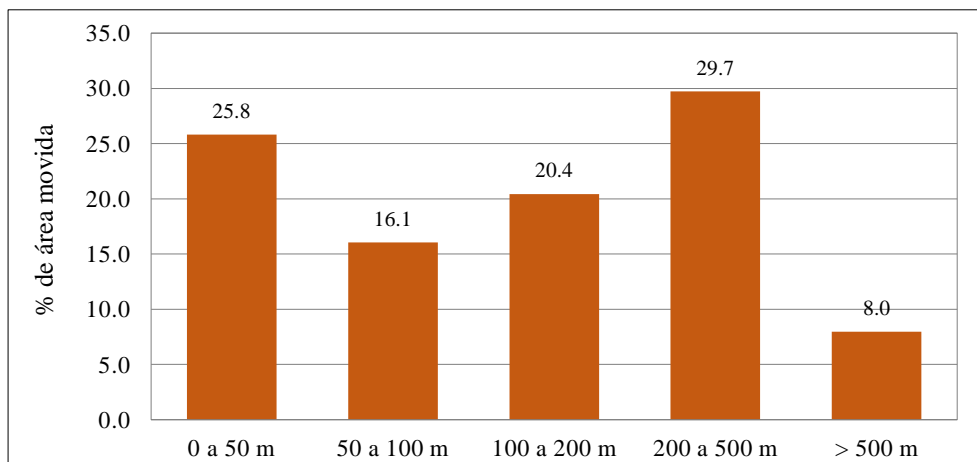


Figura 58. Porcentaje de área movida por clase de distancia a la red de drenaje.

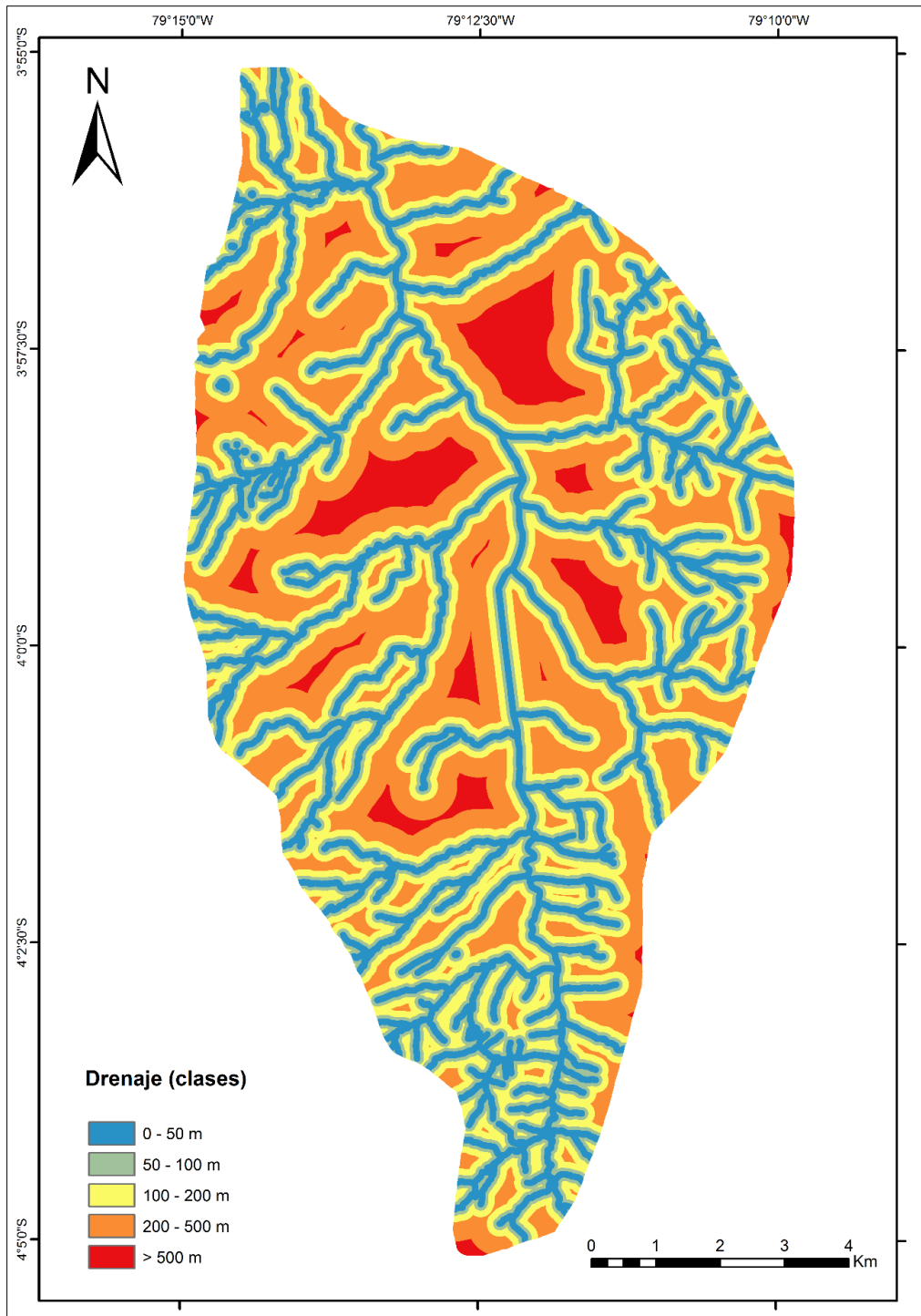


Figura 56. Mapa de distancia a la red de drenaje

4.1.1.6 Mapa de Índice Topográfico de Humedad (TWI)

El Índice Topográfico de Humedad (TWI: Topographic Wetness Index), es una variable que define la tendencia de una celda a acumular agua (Gruber & Peckham, 2009). Está relacionado con la humedad del suelo y refleja la tendencia de este a la generación de escorrentías, debido a que los perfiles con mayor humedad son más proclives a saturarse, por lo que la precipitación caída sobre ellos puede convertirse mucho más fácilmente en escorrentía (Roa-Lobo 2012). La presencia de agua afecta directamente a la estabilidad del terreno, porque por un lado aumenta el peso del volumen, por el otro, cambia significativamente la resistencia del terreno debido a la disminución de la cohesión, disminuyendo así su coherencia.

Así, cuanto más elevado es el valor de este índice, mayor humedad debe presentar la celda en función de su configuración topográfica, la cual es extraída de forma automatizada de un MDE utilizando la relación (Beven & Kirkby, 1979):

$$\text{TWI} = \ln (\text{Ca}/\tan\beta),$$

Donde:

Ca, indica el área de acumulación de flujo en la celda.

β, indica el ángulo de pendiente de la celda.

Este modelo expresa parcialmente el volumen relativo y la cantidad de movimiento del flujo que pasará por cada punto del terreno. A mayor área drenada y menor pendiente se incrementa la concentración y saturación hídrica en los suelos, áreas con valores altos de TWI son zonas de concentración del escurrimiento (Alcántara-Ayala 2000). La figura 59 representa el mapa de Índice topográfico de humedad.

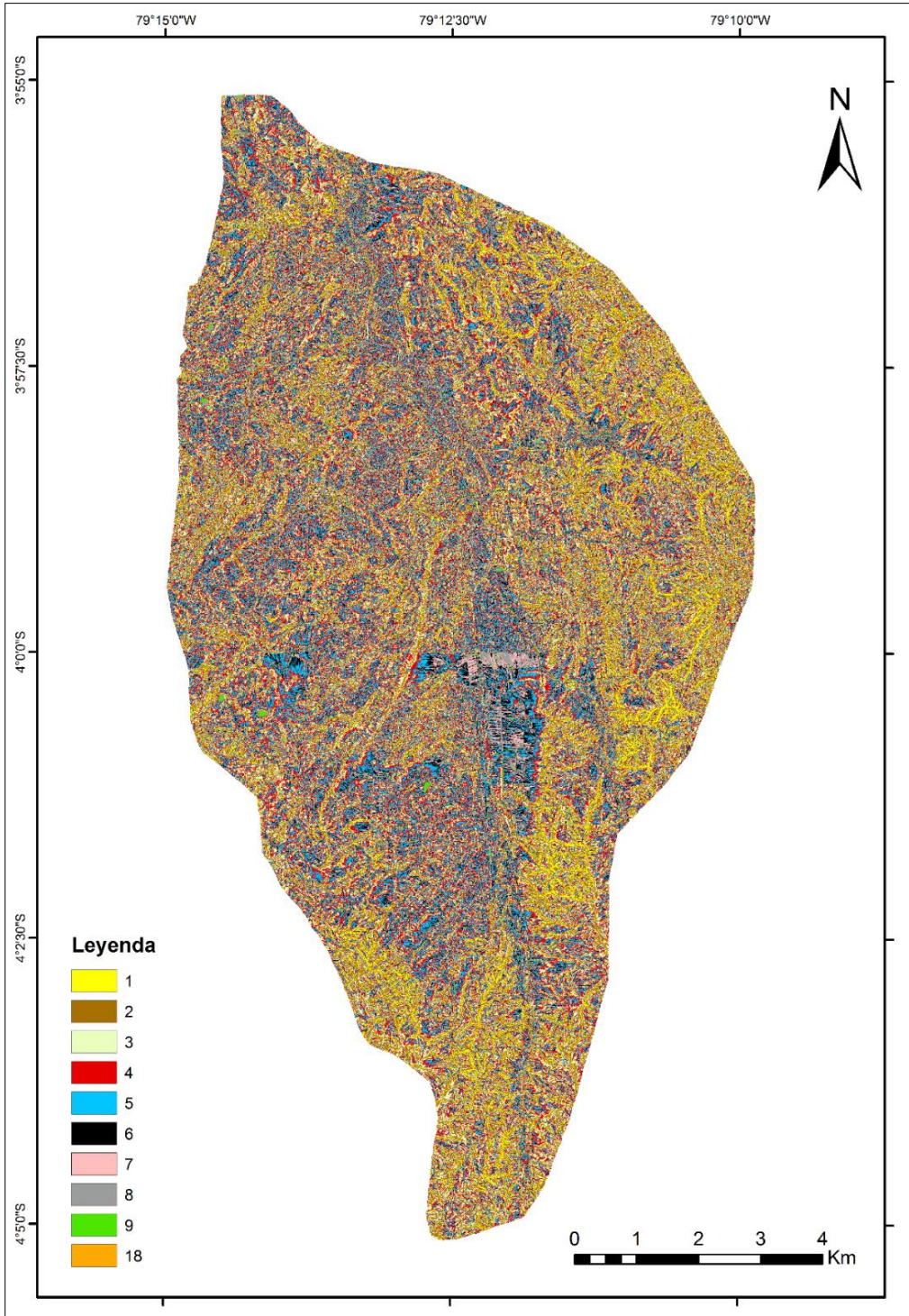


Figura 59. Mapa de Índice Topográfico de Humedad

La figura 60 muestra que la mayor cantidad de área se concentra en la clase 3 (TWI) con un 25%, seguido de la clase 4 con un porcentaje de 23% y la clase 5 con el 15%. Mientras que la figura 61 refleja que la mayor cantidad de área movida está en la clase 3 y 4 con un porcentaje de 24%, seguido de la clase 5 con un 16%. Lo cual guarda una proporción directa con los porcentajes de área total.

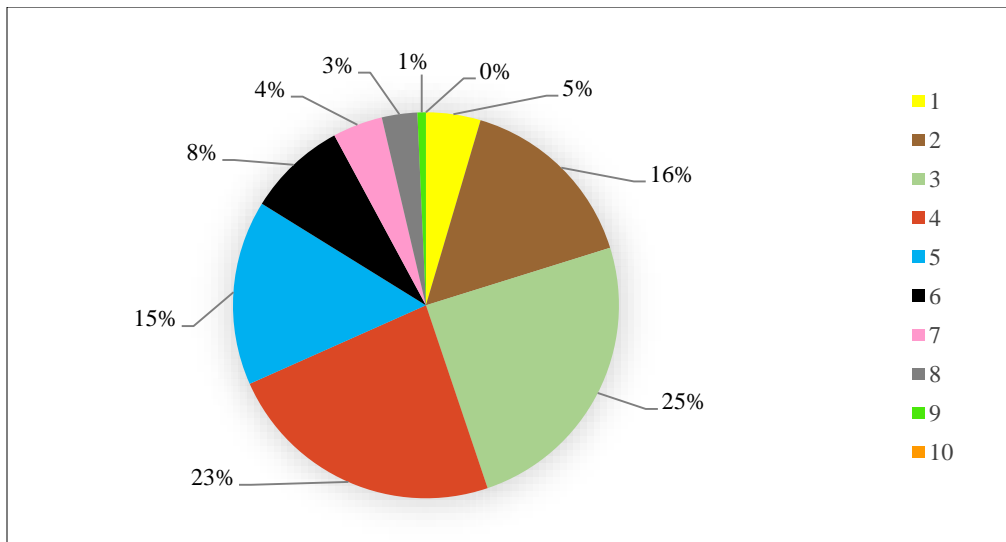


Figura 60. Distribución porcentual de área en cada clase de Índice Topográfico de Humedad.

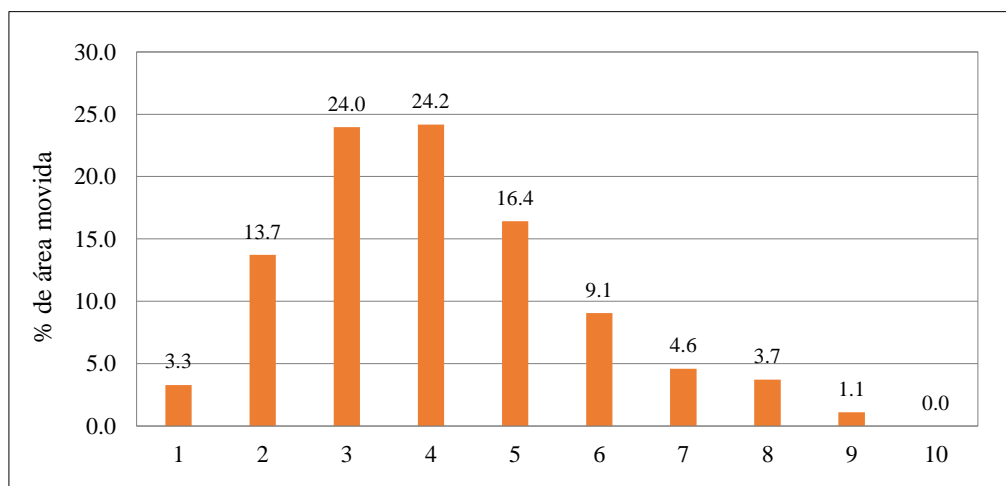


Figura 61. Porcentaje de área movida por clase de Índice Topográfico de Humedad.

4.1.1.7 Mapa de Índice de Posición Topográfica (TPI)

Corresponde a la diferencia de las elevaciones entre la celda central con sus vecinas, permitiendo caracterizar las formas locales en relación con el contexto espacial. Según López (2006), la posición topográfica es uno de los atributos más comunes de las geoformas, porque caracteriza la topografía local en relación con el contexto; es uno de los cinco atributos que describen los elementos del paisaje (Speight 1990) y es considerado un índice topográfico compuesto (Moore et al. 1991). En general, la posición topográfica se considera una variable ligeramente definida para caracterizar la topografía local con relación a su contexto espacial. Numerosos procesos físicos asociados con el crecimiento y ocurrencia de especies vegetales, propiedades del suelo y tipos de suelos, están correlacionados con la posición topográfica (Coops et al. 1998). La importancia de este concepto radica en la clasificación de geoformas, ya que ésta se basa tanto en la morfología como en la posición relativa del terreno.

Tradicionalmente se han usado métodos análogos a partir de mapas de contorno para la clasificación de las geoformas. Hoy en día el punto de partida para el análisis de geoformas se basa en datos de elevación, ya que contienen implícitamente información sobre la forma, orden vertical y magnitud de los rasgos del relieve. En definitiva los mapas de TPI nos permiten discriminar si las zonas son llanas, presentan grados de pendientes, corresponden a crestas de montaña o por el contrario son zonas de valles. La figura 62, representa el mapa de Índice de posición topográfica, generado del área de estudio.

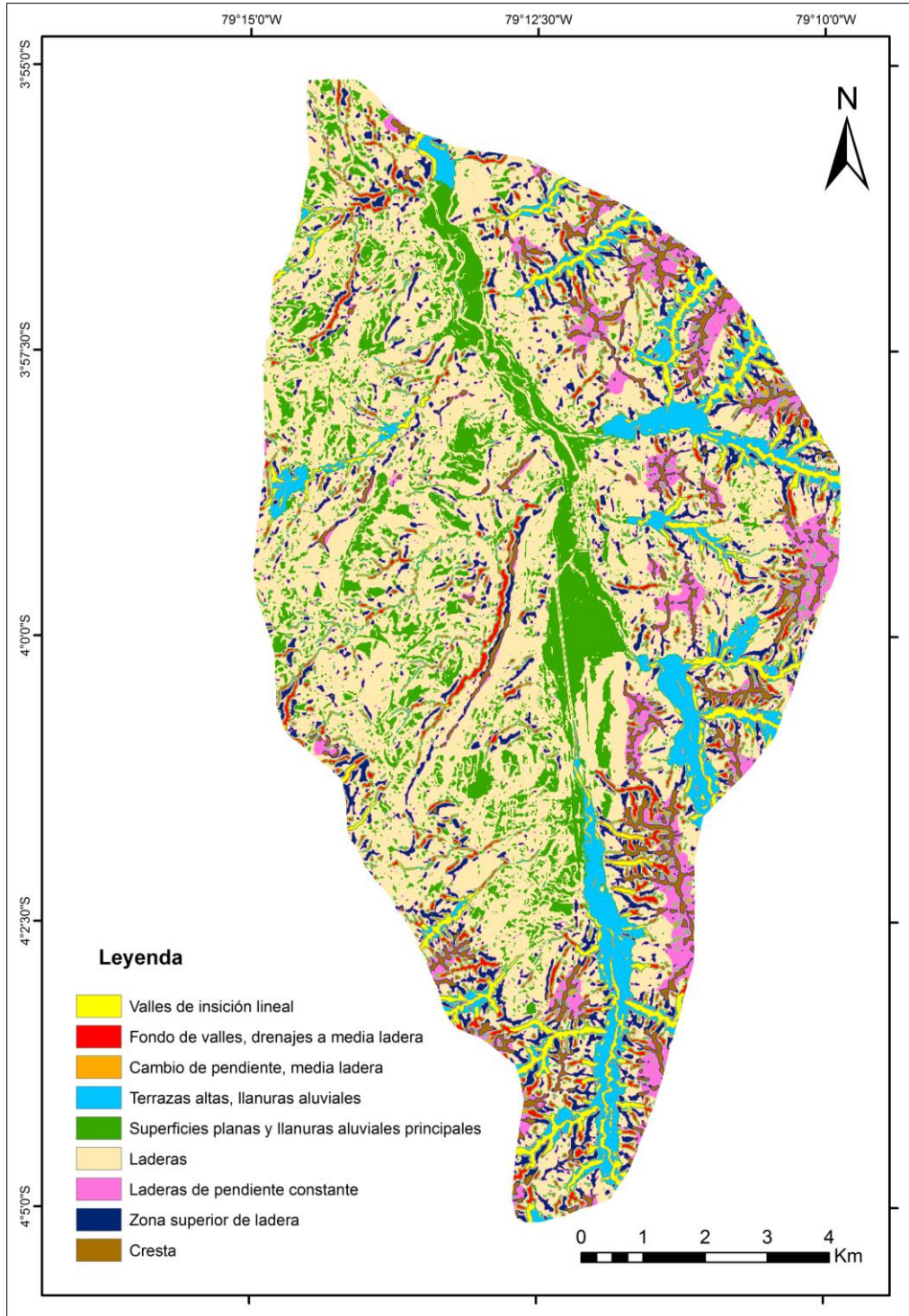


Figura 62. Mapa de Índice de Posición Topográfica

La figura 63 muestra que la mayor cantidad de área se concentra en la clase de laderas con un 49,2%, seguido de superficies planas con el 16%, mientras que la figura 64 refleja que la mayor cantidad de área movida está en la clase de laderas con el 60,9%, seguido de superficies planas con el 1,8%. Lo cual guarda una proporción directa con los porcentajes de área total.

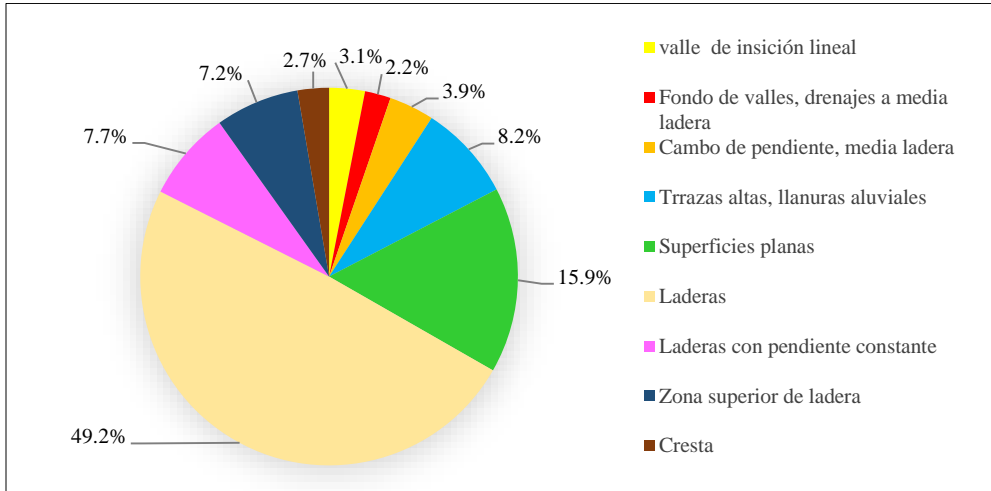


Figura 63. Distribución porcentual de área en cada clase de Índice de Posición Topográfica.

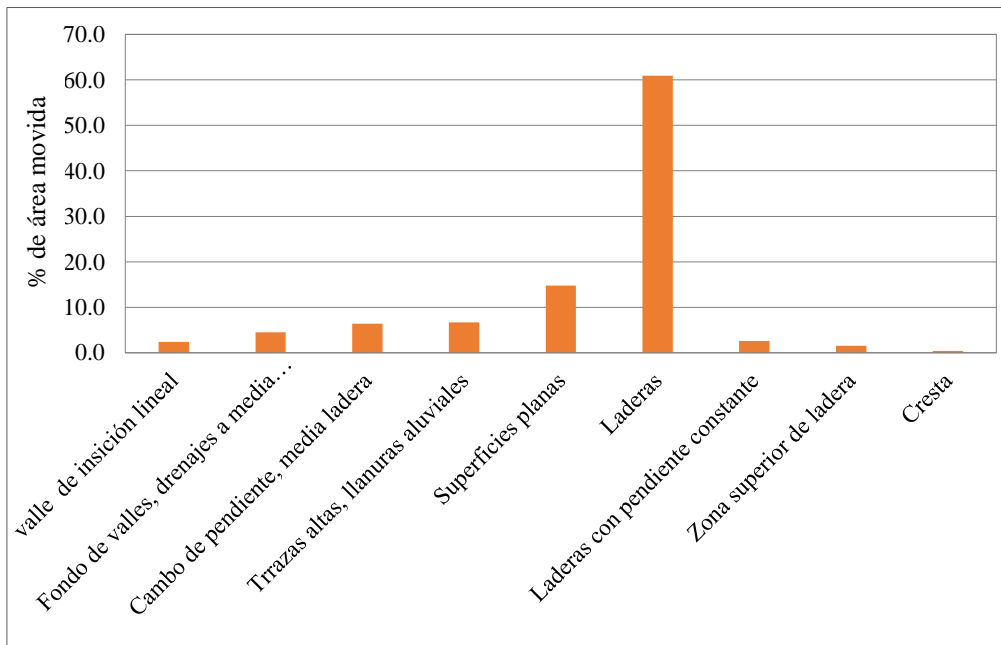


Figura 64. Porcentaje de área movida por clase de Índice de Posición Topográfica.

4.1.2 Mapas temáticos

4.1.2.1 Mapa geomorfológico.

Para la generación de este mapa se ha tomado como base el mapa geomorfológico de Cueva (2015), ajustándolo al área de estudio de esta investigación. La clasificación de las unidades geomorfológicas se realiza de acuerdo a la utilizada en el Ecuador por el “Centro de Levantamientos Integrados de Recursos Naturales por Sensores Remotos” (CLIRSEN) y Sistema Nacional de Información y Gestión de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica (SIGTIERRAS) basados en el libro y mapa “Los Paisajes Naturales del Ecuador” de Winckell A. (1997a), para la elaboración de la nueva cartografía geomorfológica a escala 1:25.000 en todo el país. La tabla 10, presenta la relación de las unidades morfológicas considerando la forma del relieve con su código y numeración correspondiente, dentro de lo que es cada unidad genética.

Tabla 10. Categorización de unidad geomorfológica

		UNIDAD GEOMORFOLOGICA	FORMA DE RELIEVE	COD	No.
UNIDAD GENETICA	DEPOSICIONAL	VALLE	Valle fluvial	Va	1
			Valle indiferenciado	Vi	2
			Valle en V	Vv	3
		TERRAZA ALUVIAL	Terraza baja y cauce actual	Tb	4
			Terraza media	Tm	5
			Terraza alta	Ta	6
			Terrazas indiferenciadas	Ti	7
		CONO	Superficie de cono de deyeccion reciente	Cy	8
			Superficie de cono de deyeccion antiguo	Cds	9
			Abrupto de cono de deyeccion antiguo	Cda	10
			Testigo de cono de deyeccion	Tcy	11
			Superficie de cono de esparcimiento	Ces	12
			Cono de derrubios	Cdr	13
		LLANURA ALUVIAL RECIENTE	Talud de derrubios	Tdr	14
			Nivel plano	Nb	15
			Nivel ondulado con presencia de agua	Na	16
			Nivel ligeramente ondulado	No	17
			Dique o banco aluvial	D	18

			Cauce abandonado	Ca	19	
			Basin	B	20	
			Meandro abandonado	M	21	
			Nivel plano/Nivel ondulado con presencia de agua	Nb/Na	22	
			Nivel ondulado con presencia de agua/Nivel plano	Na/Nb	23	
		LLANURA ALUVIAL ANTIGUA	Superficie poco disectada	L1	24	
			Superficie disectada	L2	25	
			Superficie muy disectada	L3	26	
			Depresión de decantación	Dc	27	
		DENUDATIVO	COLUVION	Coluvión reciente	Cr	28
	Coluvión antiguo			Can	29	
	COLUVIO ALUVIAL		Coluvio aluvial reciente	Cv	30	
			Coluvio aluvial antiguo	Co	31	
	GARGANTA		Garganta	Gr	32	
			Garganta con presencia de valles indiferenciados	Grp	33	
			Garganta con presencia de terrazas	Grt	34	
	ENCAÑONAMIENTO		Encañonamiento	Ec	35	
	ESTRUCTURAL		MESA	Superficie de mesa	S1	36
				Superficie disectada de mesa	S2	37
		Cornisa de mesa		S3	38	
		Vertiente de mesa		S4	39	
		Testigo de cornisa de mesa		S5	40	
		Encañonamiento de mesa		S6	41	
		CUESTA	Superficie de cuesta	C1	42	
			Frente de cuesta	C2	43	
			Vertiente de cuesta	C3	44	
		CHEVRONES	Superficie de chevron	K1	45	
Frente de chevron	K2		46			
TECTONICO EROSIVO	RELIEVE	Relieve ondulado	R1	47		
		Relieve colinado muy bajo	R2	48		
		Relieve colinado bajo	R3	49		
		Relieve colinado medio	R4	50		
		Relieve colinado alto	R5	51		
		Relieve colinado muy alto	R6	52		
		Relieve montañoso	R7	53		
		Cerro testigo	Ct	54		
		Escarpe de falla	Ef	55		
		Picos y afloramientos rocosos	Par	56		
VOLCANICO EROSIVO	EDIFICIO VOLCANICO	Crater	Kt	57		
		Flancos de volcán	Fvo	58		
		Caldera	Kd	59		
		Flujos de lava	Flv	60		
		Flujos de lodo	Fld	61		

MODELADO GLACIAR	VALLE GLACIAR	Fondo de valle glaciar	Fvg	62
		Vertiente de valle glaciar	Vvg	63
		Arista	Art	64
		Rocas aborregadas	Rab	65
		Drumlins rocosos	Dro	66
	CIRCO GLACIAR	Fondo de circo glaciar	Fcg	67
		Pared de circo glaciar	Pcg	68
		Morrena de fondo	Mfo	69
		Morrena lateral	Mla	70
		Morrena de frente	Mfr	71
	No aplicable		No aplicable	NA

La figura 65 representa el mapa geomorfológico de la zona de estudio, tomando básicamente el criterio de la Unidad Genética para su generación (Tabla 10). Los resultados del mapa indican que se logró determinar un total de 107 geofomas, agrupadas en 16 unidades geomorfológicas que se resumen en la tabla 11 y luego se explican en detalle.

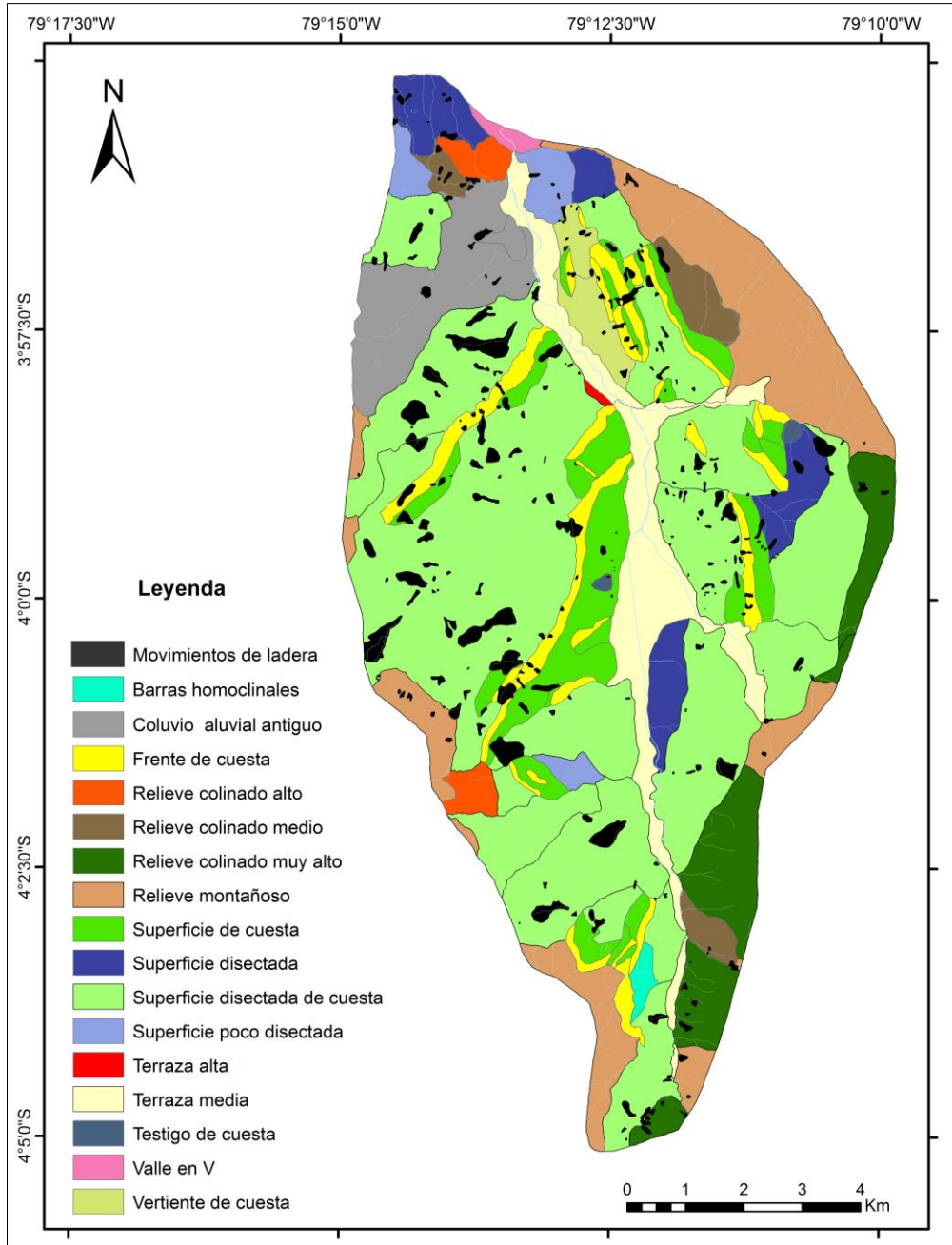


Figura 65. Mapa geomorfológico, en el cual se representa las unidades de relieve y los movimientos de ladera inventariados.

Tabla 11. Categorización de unidades geomorfológicas del área de estudio

UNIDAD GENÉTICA	UNIDAD GEOMORFOLÓGICA	Nº DE GEOF.	Ha.	Código
ESTRUCTURAL	Superficie de cuesta	23	808,7	C1
	Frente de cuesta	26	550,5	C2
	Vertiente de cuesta	2	164,6	C3
	Testigo de cuesta	2	17,5	C4
	Superficie disectada de cuesta	17	4958,3	C5
	Barras homoclinales	1	34,5	Bh
DENUDATIVO	Coluvio aluvial antiguo	2	568,5	Co
TECTONICO EROSIVO	Relieve montañoso	9	1265,9	R7
	Relieve colinado muy alto	5	611,7	R6
	Relieve colinado alto	2	129,9	R5
	Relieve colinado medio	3	223,1	R4
DEPOSICIONAL	Superficie poco disectada	3	188,2	L1
	Superficie disectada	4	463,8	L2
	Terraza alta	1	7,7	Ta
	Terraza media	6	769,5	Tm
	Valle en V	1	31,9	Vv

Unidad Genética Estructural: Corresponde a los depósitos sedimentarios que forman estructuras plegadas y que tiene un nivel de sedimentación formando capas estratigráficas. Se ilustran en la figura 66 y se describen a continuación:

a. *Superficie de cuesta (C1).*- La unidad se encuentra formada por series monoclinales de escaso buzamiento, formada como consecuencia de la degradación parcial de los estratos sedimentarios suavemente plegados, morfológicamente presentan vertientes rectilíneas. Dentro de la cuenca de Loja se encuentra en la parte norte, la parte sur, este y oeste, siendo zonas de cultivos, zona urbana y vegetación herbácea. Muestran una pendiente entre 25 a 40%, 12 a 25% y 5 a 12%, con desniveles relativos entre 15 a 25 m, 25 a 50 m, 50 a 100 m; 100 a 200 m y 200 a 300 m. Ocupan una superficie de 808,7 hectáreas.

b. *Frente de cuesta (C2).*- Corresponde a la vertiente más escarpada y de menor longitud que presenta una cuesta, generalmente tienen pendientes mayores que la superficie; se distribuyen en la cuenca de Loja en la parte noreste y noroeste cerca de la ciudad, son zonas en donde existe vegetación herbácea, arbórea y en ciertas zonas urbanización. Su pendiente va entre 25 a 40% y 40 a 70%, y desniveles relativos entre 25 a 50 m, 50 a 100 m y 100 a 200 m, ocupando una superficie de 550,5 hectáreas de terreno.

c. *Vertiente de cuesta (C3).*- Constituyen las laderas inferiores de una cuesta estructural. Dentro de la cuenca de Loja se encuentran en la parte norte, cubiertas por vegetación herbácea y arbórea. Su desnivel relativo va desde 25 a 50 m y 50 a 100 m con una pendiente de entre 25 a 40% y 12 a 25%. Ocupan una superficie de 164,6 hectáreas.

d. *Testigo de cuesta (C4).*- Sobresale en un relieve erosionado por los procesos erosivos en una superficie de cuesta aislada, el cual muestra los rasgos de la estructura original, se encuentra ubicado en la parte urbana del cantón. Existen dos tipos de acuerdo al porcentaje de pendiente que va de 25 a 40% con desnivel relativo de 25 a 50 m y de 5 a 12% con un desnivel relativo de 15 a 25 m, ocupando una superficie de 17,5 hectáreas.

e. *Superficie disectada de cuesta (C5).*- Unidad geomorfológica que ha sufrido cierto proceso de erosión en surcos, se encuentra a lo largo de la parte central de la cuenca de Loja extendiéndose en su mayoría al oeste de la cuenca. Geoformas que tienen pendiente de entre 12 a 25%, y 25 a 40% con desnivel relativo de 5 a 15 m, 15 a 25 m, 25 a 50 m, 50 a 100 m y 100 a 200 m. Ocupan una superficie de 4.958,3 hectáreas.

f. *Barras homoclinales (Bh).*- Estructura geológica en la cual sus estratos presentan buzamientos en una sola dirección e inclinación uniforme, se localizó un solo tipo ubicado al Sur-Este de la cuenca. Tiene un desnivel relativo de 100 a 200 m con una pendiente dominante de 40 a 70%. La superficie que ocupa es de 34,51 hectáreas.



Figura 66. Tipos de relieves de la Unidad genética estructural a) Barras homoclinales b) Superficie de cuesta c) Frente de cuesta d) Vertiente de cuesta e) Testigo de cuesta f) Superficie disectada de cuesta.

Unidad Genética Denuiativa: Son depósitos que han sido acumulados a media ladera y su proceso de transporte ha sido mínimo, entre estos tenemos.

a. *Coluvio aluvial antiguo (Co).*- Esta unidad se extiende al Noroeste de la cuenca de Loja, desde el sector de Motupe hasta Carigan, el mismo se encuentra cubierto en parte por la zona urbana de la ciudad y por zonas de cultivos y vegetación herbácea (Figura 67). Esta unidad tiene una pendiente entre 5 a 12% y desniveles relativos entre 50 a 100 metros y 15 a 25 metros, cubriendo una superficie de 568,5 hectáreas.



Figura 67. Coluvio aluvial antiguo (Unidad genética deposicional).

Unidad Genética Tectónico Erosivo: Son los relieves que más predominan en el cantón de Loja; se encuentran desarrollados sobre rocas metamórficas que van desde filitas, esquistos sericíticos, grafitosos, cuarcíticos y gneis. Se ilustran en la figura 68 y se describen a continuación:

a. *Relieve montañoso (R7).*- se encuentran distribuidas en la parte sur, este y oeste de la cuenca de Loja, desarrollados sobre rocas metamórficas; morfológicamente presentan cimas agudas en su mayoría, asociadas a vertientes rectilíneas y cóncavas. Este tipo de relieves presentan pendientes muy fuerte de

70 a 100% y fuertes de 40 a 70%, con un desnivel relativo > 300 m dominante. Ocupan una superficie de 1.265,9 hectáreas.

b. *Relieve colinado muy alto (R6).*- Se encuentran distribuidos en el sur de la cuenca de Loja, subordinados a los relieves montañosos, sin embargo existe éste tipo de relieves en zonas específicas al Norte y al centro Sur del cantón. Presentan pendientes que van de 70 a 100% y de 40 a 70%, con un desnivel relativo de 200 a 300 m. Ocupa una superficie de 611,7 hectáreas.

c. *Relieve colinado alto (R5).*- Se encuentran en zonas específicas al norte y este de la cuenca de Loja; presentan cimas redondeadas asociadas a vertientes convexas y mixtas en su mayoría, aunque también se observan cimas agudas, asociadas a vertientes cóncavas e irregulares. Presentan pendiente de 40 a 70% y 25 a 40% con un desnivel relativo de 100 a 200 m. Ocupan una superficie de 129,9 hectáreas.

d. *Relieve colinado medio (R4).*- se observan en zonas específicas de la parte norte y sur de la cuenca de Loja, se desarrolla dentro de materiales como: filitas, esquistos grafiticos, cuarcitas, gneis, etc. Presentan pendientes de 12 a 25% y 5 a 12%, con un desnivel relativo que va desde los 50 a 100 m. Ocupan una superficie de 223,1 hectáreas

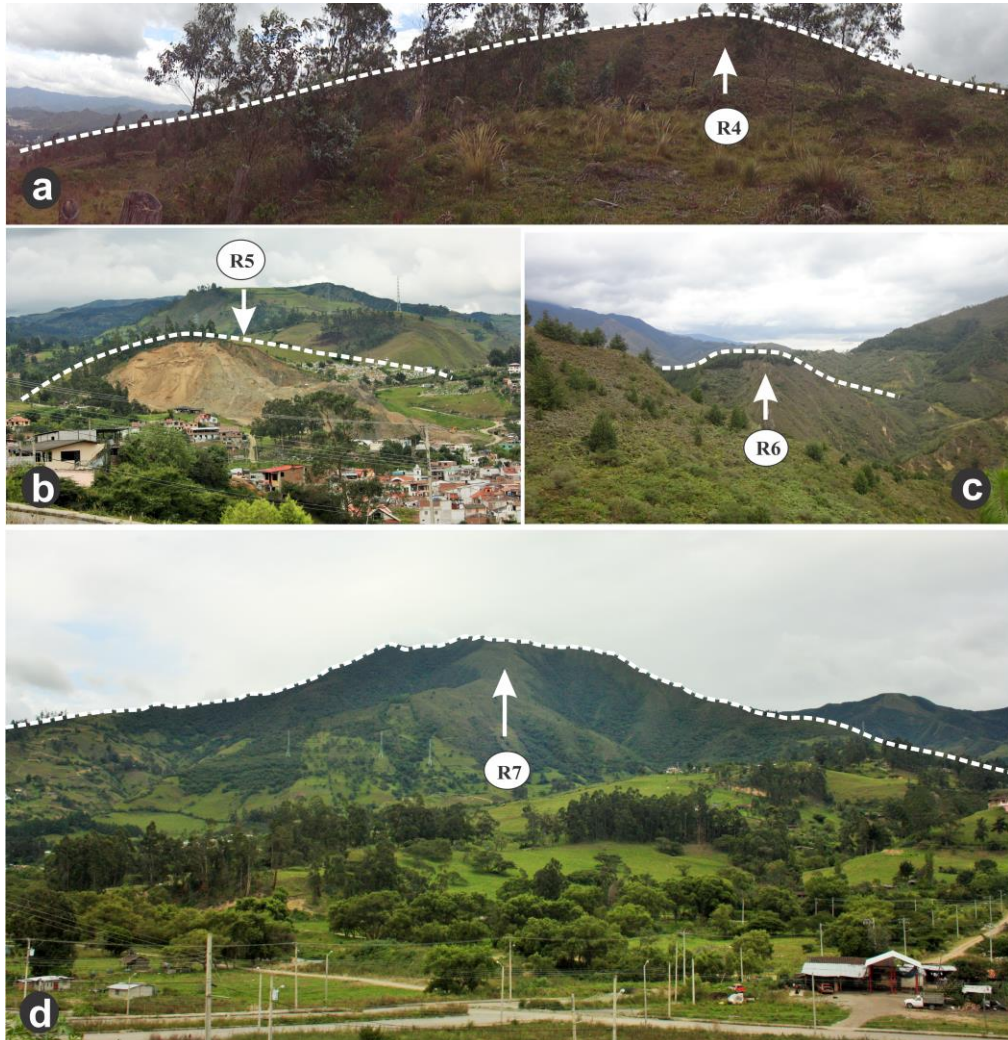


Figura 68. Tipos de relieve de la Unidad genética tectónico erosivo a) Relieve colinado medio b) Relieve colinado alto c) Relieve colinado muy alto d) Relieve montañoso (Fuente: modificado de Cueva G. 2015).

Unidad Genética Depositional: Corresponden a los depósitos aluviales que se encuentran en los márgenes de los ríos Malacatos, Jipiro, Zamora Huayco y Zamora, ubicados en el centro de la cuenca. Estas unidades geomorfológicas se ilustran en la figura 69 y se describen luego:

a. *Superficie poco disectada (L1).*- superficie originada por la erosión de los depósitos sedimentarios, constituido por relieves ondulados donde la mayor parte de su superficie está cubierto por vegetación herbácea y es destinado para

uso agrícola-ganadero. Esta geoforma tiene una pendiente entre 5 a 12% y 12 a 25% con desnivel relativo entre 15 a 25 m y 50 a 100 m. Tiene una extensión de 188,2 hectáreas.

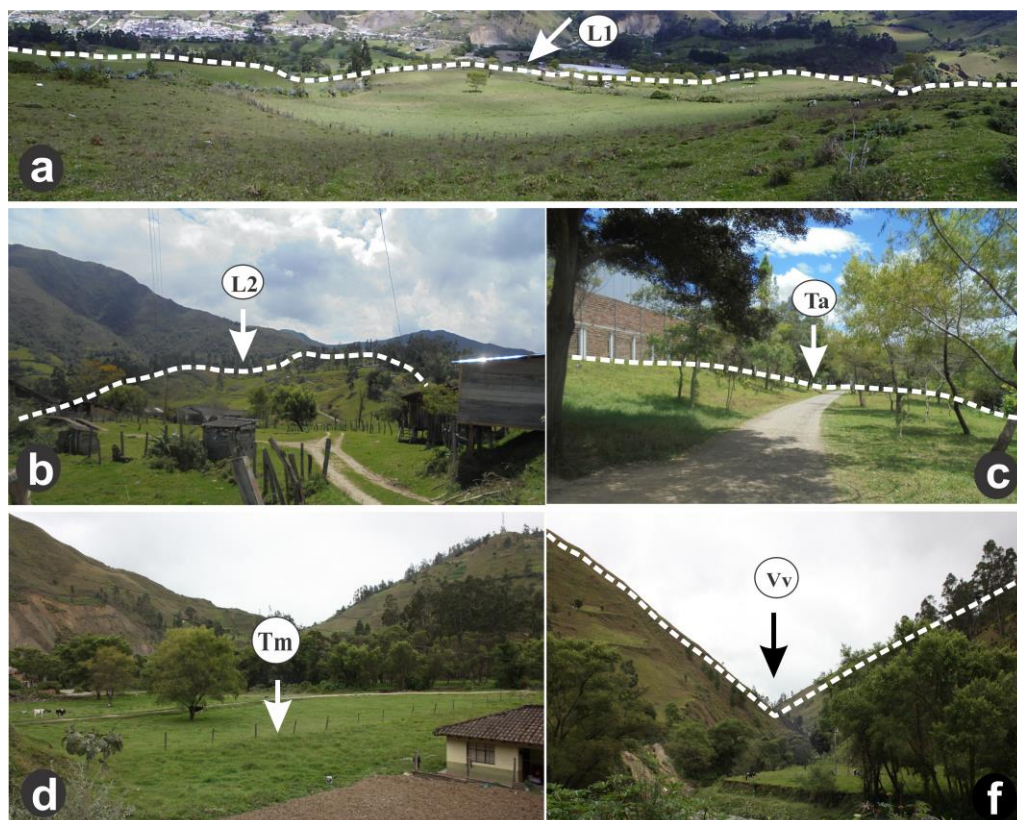


Figura 69. Tipos de relieves de la Unidad genética deposicional a) Superficie poco disectada b) Superficie disectada c) Terraza alta d) Terraza media e) Valle en "V". (Fuente: modificado de Cueva G. 2015).

b. *Superficie disectada (L2).*- formado por la erosión de los depósitos sedimentarios, constituido por terrenos ondulados en los cuales se desarrolla la zona urbana de la ciudad de Loja; y en algunos sectores se realizan actividades agrícolas-ganaderas (por ejemplo en Jipiro al Este y sector Shucos al Noreste). Tiene pendientes que van de 5 a 12%, 12 al 25% y 25 a 40%, cuya superficie abarca 463,8 hectáreas.

c. *Terrazas altas (Ta).*- se encuentra sobre la terraza media, ubicado en el borde Oeste del río Zamora en el sector las Pitás, actualmente está ocupado por construcciones y viviendas. Su pendiente varía entre 0 a 2%, con desnivel relativo entre 0 a 5 m. Ocupa un total de 7,73 hectáreas.

d. *Terrazas medias (Tm).*- la mayor parte de su superficie se encuentra ocupada por la zona urbana de la ciudad de Loja y zonas agrícolas. La pendiente establecida varía de 2 a 5% y 0 a 2%, con desniveles relativos que varían entre 0 a 5 m hacia el norte y entre 5 a 15 m dentro de la ciudad. Esta geoforma ocupa un total de 769,5 hectáreas.

e. *Valle en V (Vv).*- se encuentra ubicado al Norte de la cuenca de Loja, por donde fluye el río Zamora, el cual rompe la cordillera formando una geoforma pronunciada cuya pendiente va de 70 a 100 % y cubre una superficie de 31,89 hectáreas.

En la figura 70 se observa el porcentaje de área distribuido por unidad de relieve o geomorfológica. La unidad genética que mayormente predomina en la zona de estudio es la de tipo “Estructural”, siendo la unidad geomorfológica llamada “Superficie disectada de cuesta (C5)” la de mayor presencia con una extensión de 4.958,3 ha, lo que representa el 46% de toda el área. Y la figura 71 indica que la unidad de relieve con mayor presencia de área movida igualmente es la “superficie disectada de cuesta” con el 69,7%, luego están la “superficie de cuesta” y “frente de cuesta” con el 7,7% cada una.

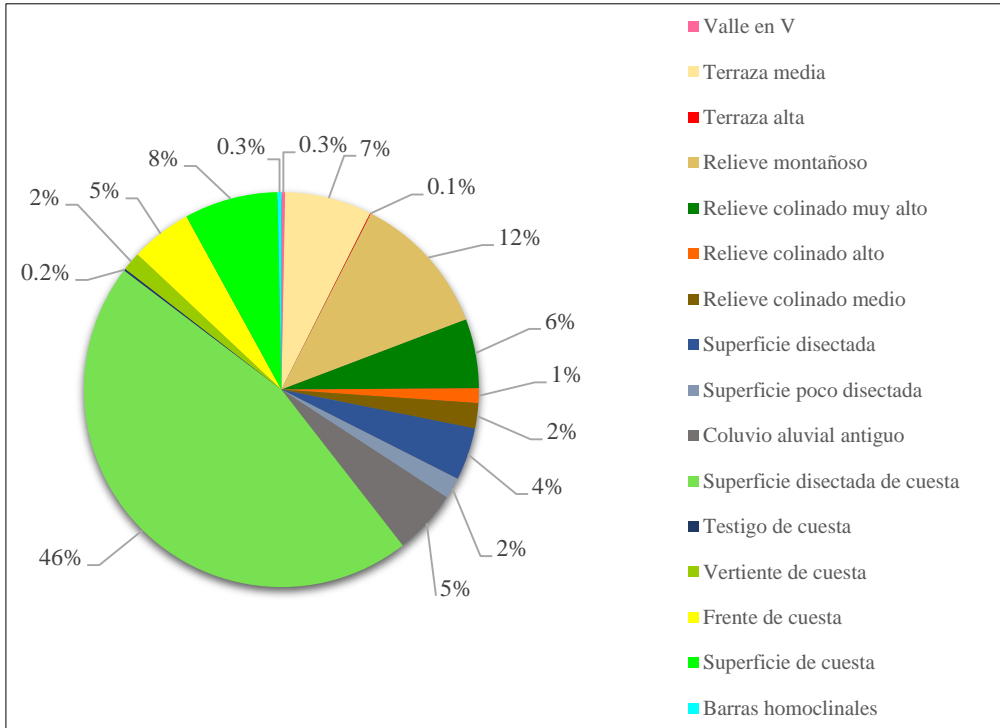


Figura 70. Distribución porcentual de las diferentes unidades de relieve.

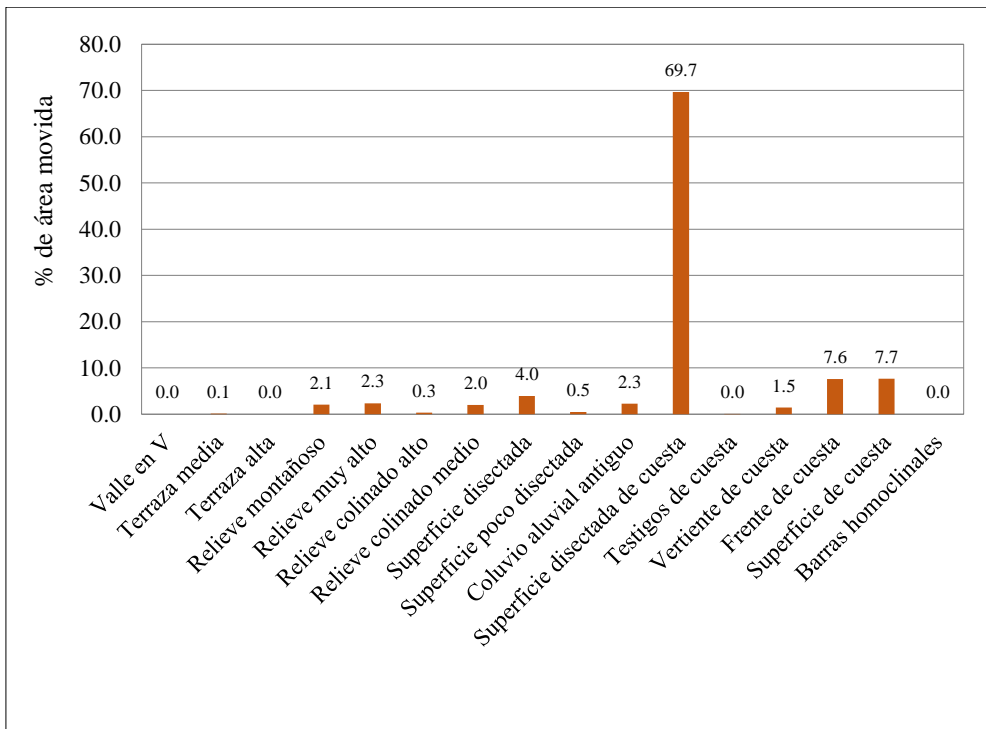


Figura 71. Distribución porcentual de área movida por unidad de relieve.

4.1.2.2 Mapa de Uso del suelo

El uso del suelo es un elemento fundamental para determinar la resistencia que presentan las laderas frente a determinados procesos naturales que implican su erosión así como su comportamiento frente a la inestabilidad de laderas. El tipo de cobertura vegetal y su densidad influyen en la estabilidad de las laderas mediante mecanismos que se pueden clasificar como hidrológicos y mecánicos. Los hidrológicos comprenden la capacidad de infiltración en el suelo, la humedad del suelo, evapotranspiración, etc., mientras que los mecánicos traducen el aumento de resistencia que proporcionan las raíces y la protección frente a la erosión (Mulder 1991; Constanzo 2012). La vegetación puede influir de manera beneficiosa o adversa en la estabilidad de las laderas, dependiendo de cómo actúen los mecanismos mencionados (Baeza 1994). Un ejemplo de ello es: mientras las raíces aumentan la resistencia del suelo, al mismo tiempo favorecen una mayor infiltración del agua de lluvia.

Para la generación de este mapa se toma como base el generado por Carrillo 2010, y sobre el cual se realiza una actualización de los diferentes polígonos de uso del suelo. La figura 72 representa el mapa de uso del suelo de la zona de estudio, agrupado en las categorías que se describen.

Área urbana: Comprende las áreas que se encuentran dentro del perímetro urbano establecido por el Municipio de Loja y está ocupado por construcciones.

Bosque de neblina: Bosque natural complejo y variado de alta montaña, los cuales se encuentran por encima del límite superior de los bosques alto andinos. En este caso algunos se encuentran bordeando el área de estudio.

Lagunas: Se refiere al depósito natural de agua que tiene una menor dimensión que el lago y cuyas aguas suelen ser dulces; Ej. Lagunas naturales del sector Daniel Álvarez y Punzara.

Cultivos: En el área de estudio generalmente se asocian a huertos familiares al entorno de las viviendas; Ej. Cultivos ubicados en el sector El Capulí y Tierras Coloradas.

Matorral: Terrenos donde predominan arbustos bajos y ramosos; Ej. Matorral del sector Zamora Huayco.

Pastizales: Extensiones de terreno donde predomina el pasto; Ej. Pastos naturales del sector Jipiro Alto y Pastizales del sector La Argelia.

Plantación de eucalipto: Son superficies recubiertas con arbolado de eucalipto no muy densas con presencia de pastizales y matorrales. Ej. Plantaciones del sector los dos puentes.

Plantación de pino: Son superficies recubiertas de forma no muy densa, con arbolado de pino y presencia de matorrales y ciprés.

Los datos de uso del suelo indican que el área de estudio está ocupada principalmente por: Pastizal con un 51,8%, la zona urbana con 21,7% y cultivos con el 8,7%; estas representan un 82,2% que corresponde a 8.872,7 ha del total de área estudiada (Figura 73). Comparando con la distribución de los movimientos de ladera, también son los tipos de uso de suelo en los que en mayor cantidad se manifiestan los movimientos de ladera con el 64% en pastizales y 15,8% en cultivos (Figura 74). Lo cual se por la gran acumulación de agua que existe en esas zonas debido a que los pobladores las destinan para la crianza de ganado vacuno principalmente, y para cultivos tipo huertos familiares (Figura 75), lo que conlleva a un mal uso del agua de regadío.

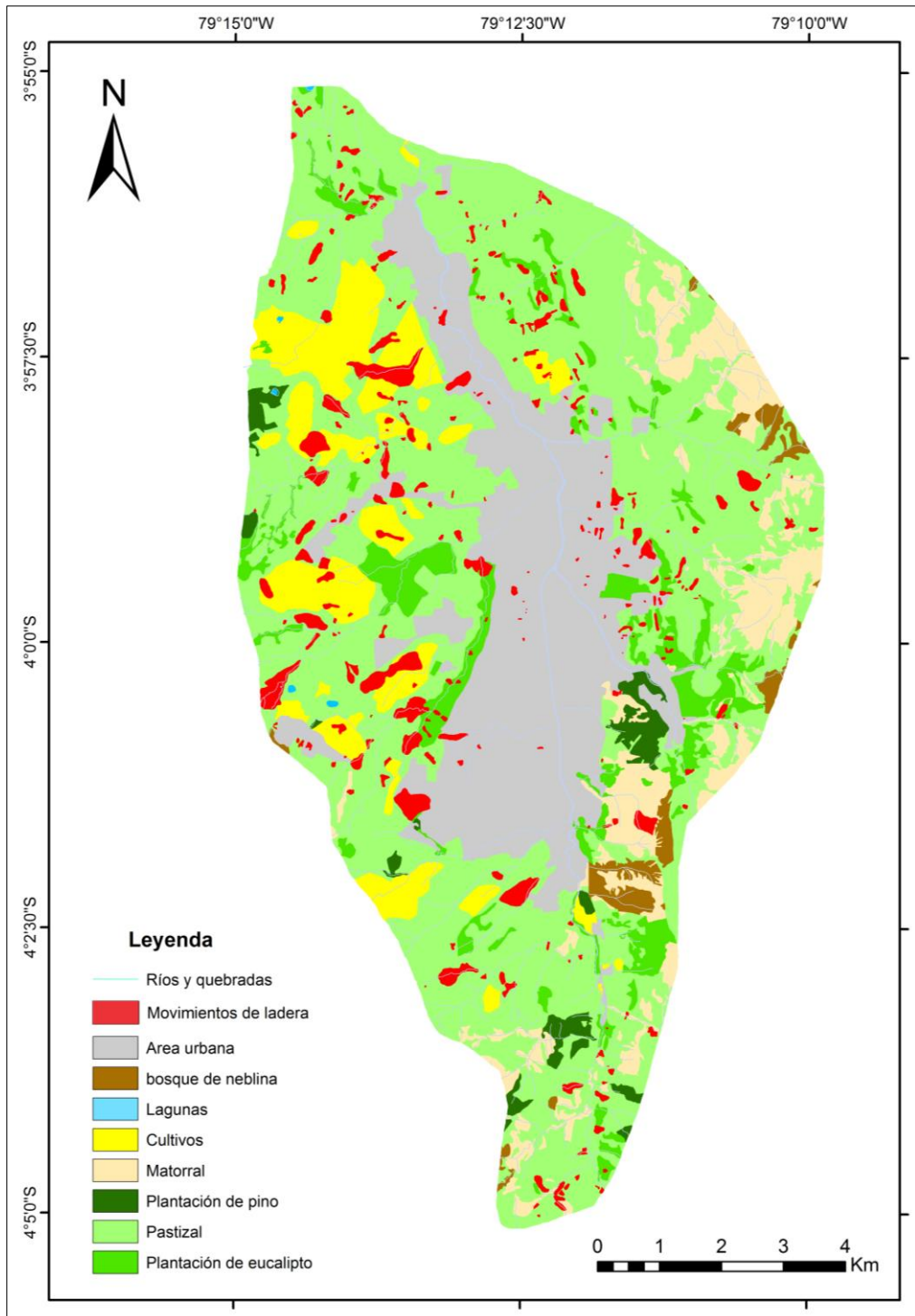


Figura 72. Mapa de uso del suelo con la ubicación de los movimientos de ladera.

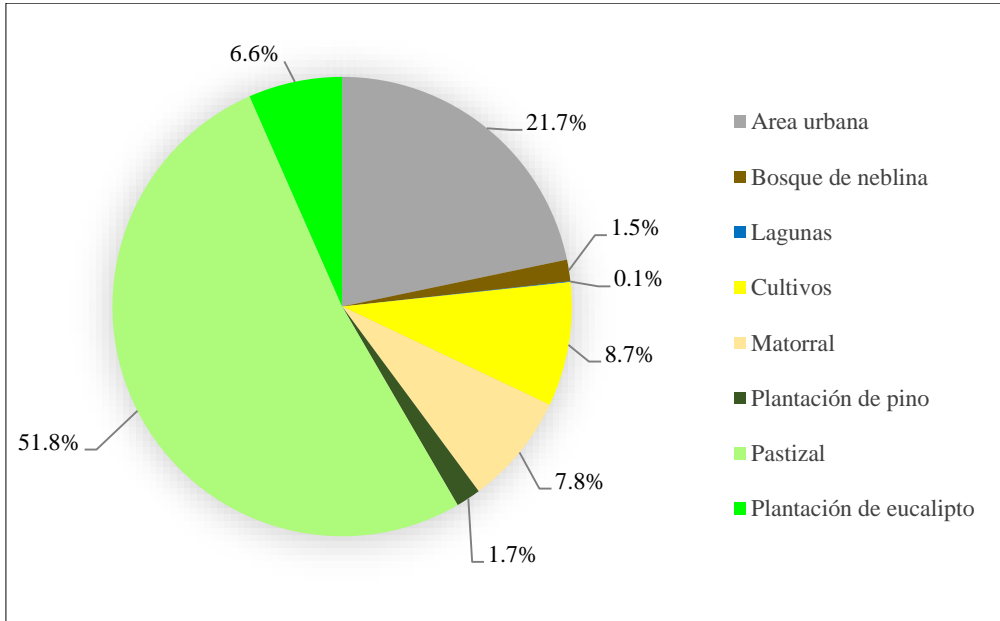


Figura 73. Distribución porcentual de uso del suelo.

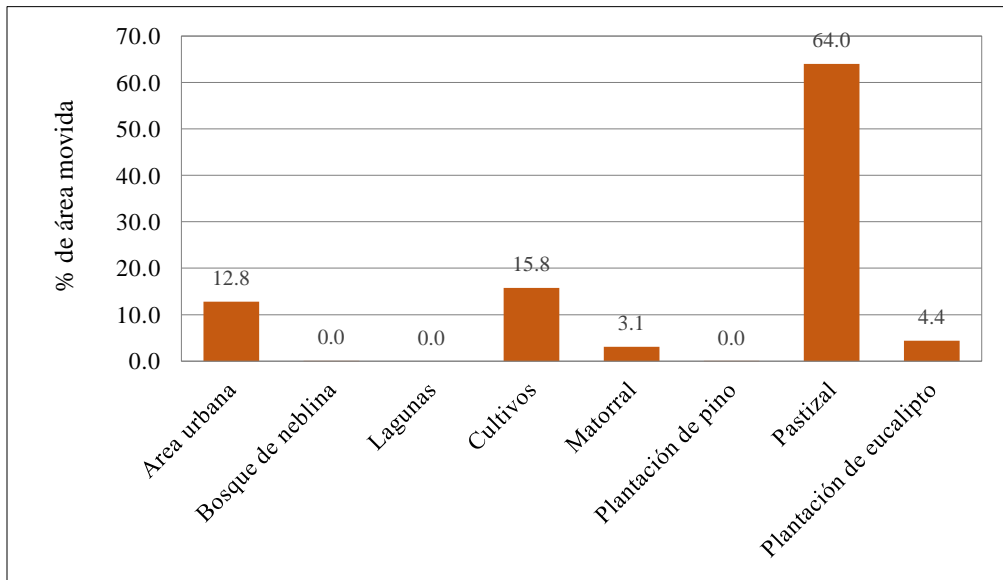


Figura 74. Distribución porcentual de área movida por unidad uso de suelo.

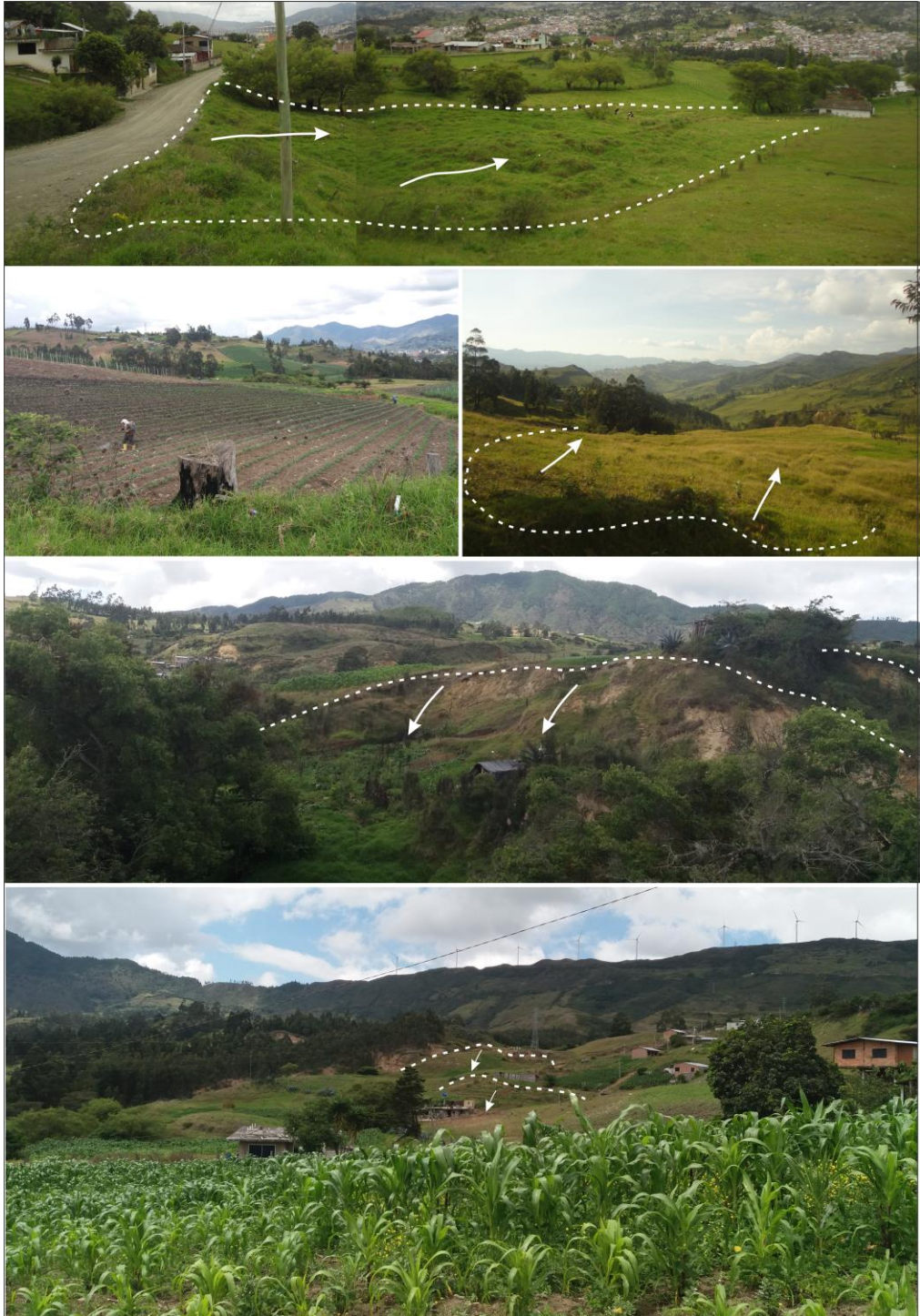


Figura 75. Fotografías en las cuales se evidencia los procesos de reptación que luego derivan a flujos los cuales se generan en zonas de pastizales y cultivos.

4.1.2.3 Mapa Geológico

En este mapa se ha localizado las diferentes formaciones geológicas del área de estudio definiendo sus contactos y datos estructurales (Figura 76), para el cual se ha tomado como base la estratigrafía descrita por Hungerbühler et al. (2002) y mapa geológico de Tamay et al. (2016). La descripción estratigráfica de muro a techo se describe a continuación.

Unidad Chiguinda (*Paleozoico*)

Predomina en la parte sur de la Cordillera Real, forma parte del basamento de las Cuencas de Loja y Malacatos-Vilcabamba. Su litología comprende cuarcitas impuras de grano fino a medio, filitas negras, pizarras y esquistos (algunos gráfiticos). El espesor es desconocido, pero se estima que puede ser de algunos kilómetros (Litherland et al. 1994).

Formación Trigal (*Mioceno medio*).

Esta aparece en el río Trigal, a lo largo de la carretera principal desde Loja a Catamayo. La formación está en un área relativamente pequeña, a lo largo del margen nor-occidental de la cuenca. Consiste en estratos de arenisca de grano grueso con finas capas de limolitas y conglomerados. Estos conglomerados están compuestos por pequeños clastos volcánicos (>1 cm). Las areniscas presentan estratificación horizontal, estratificación cruzada y, además, contienen pequeños fragmentos de carbón. Su espesor varía desde 50 m en el oeste a 150 m en el este, aproximadamente. La base de la formación es un límite discordante con las rocas metamórficas paleozoicas y está sobrepuesta concordantemente por la formación La Banda. Se interpreta que esta formación rocosa se depositó originalmente en un medio fluvial (Hungerbühler et al. 2002).

Formación La Banda (*Mioceno Medio Tardío*).

Aflora en la parte nor-occidental de la cuenca, atravesando la carretera principal desde Loja a Cuenca cerca de la Quebrada La Banda y la carretera Loja-

Catamayo en el sector “El Plateado”, aflora al nor-oeste de la cuenca, donde forma un intervalo muy persistente. Litológicamente está constituida por estratos gruesos de calizas masivas, lutitas carbonatadas, capas finas de cherts (sílices) y areniscas amarillas de textura fina. Existe presencia de yeso secundario en las fracturas. El espesor varía de 10 a 20 m. Tiene un origen lacustre con incursiones marinas. Esta formación sobreyace a la formación Trigal, con un contacto local concordante, y es sobrepuesta concordantemente por la Formación Belén (Hungerbühler et al. 2002).

Formación Belén (*Mioceno inferior*).

Yace cerca del pueblo de Belén en la Cuenca de Loja. Aflora sólo al oeste del Río Zamora en la parte nor-occidental de la cuenca. Compuesta por capas de areniscas gruesas y finas, con intercalaciones de conglomerados y en menor cantidad capas de lutitas. Además se distinguen pliegues de slump y laminación convolucionada de diferentes escalas (cm a m). El máximo espesor es 300 m. Su origen indica una transición de un ambiente lagunal (Fm. La Banda) a un entorno fluvial deltaico de carga mixta. La formación Belén descansa concordantemente sobre la formación La Banda (Hungerbühler et al. 2002).

Formación San Cayetano (*Mioceno tardío a último*).

Esta formación solo está presente al este del Río Zamora, cerca del barrio de San Cayetano. Se compone de areniscas de grano fino, lutitas calcáreas (margas) y silíceas, diatomitas, carbón tipo lignito e intercalaciones de conglomerados. La formación se puede dividir en tres miembros con límites transicionales (Hungerbühler, 2002). *Miembro Arenisca Inferior*.- contiene areniscas de color marrón, algunas pequeñas capas de conglomerados y lutitas, dentro de las lutitas hay varias capas de carbón, que fueron estudiadas por Putzon (1968). Los conglomerados son canalizados y contienen exclusivamente clastos metamórficos. Las lutitas contienen gasterópodos y una rica macroflora. *Miembro Limolitas*.- este abarca lutitas de color marrón, gris y blanco,

abundantes capas de diatomita y algunos piroclásticos horizontales (Tobas). Este fino material aparece horizontalmente estratificado y capas laminadas de 1 a 2 cm de espesor. *Miembro Arenisca Superior*.- está dominado por areniscas de grano fino, arcillas de color gris intercalado con lentes de conglomerado de clastos metamórficos y matriz areno-arcillosa, a más de capas de limolitas. Tiene un espesor aproximado de 800 m. El ambiente de formación inicia con un sistema lagunar de agua dulce y un posterior aporte fluvial de carga mixta. Aparece discordante sobre la Unidad Metamórfica Chiguinda (Hungerbühler et al. 2002).

Formación Quillollaco (*Mioceno último*).

Está aflorando en toda la cuenca, excepto en el borde nor-occidental. Litológicamente está formado por conglomerados clastosoportados y lentes de arenisca. Los clastos son metamórficos redondeados, tales como: filitas, cuarcitas, vetas de cuarzo y esquistos hasta 50 cm de diámetro. En la parte sur de la cuenca la potencia llega a alcanzar un máximo de 600 m, mientras que la parte central llega a 100 m, y a lo largo del margen oriental de la cuenca el espesor es 500 m aproximadamente. Corresponde a un ambiente de formación de abanico aluvial con flujo de detritos de aporte metamórfico. La base de la formación es un límite discordante con las formaciones más antiguas (Trigal, Belén y San Cayetano) (Hungerbühler et al. 2002).

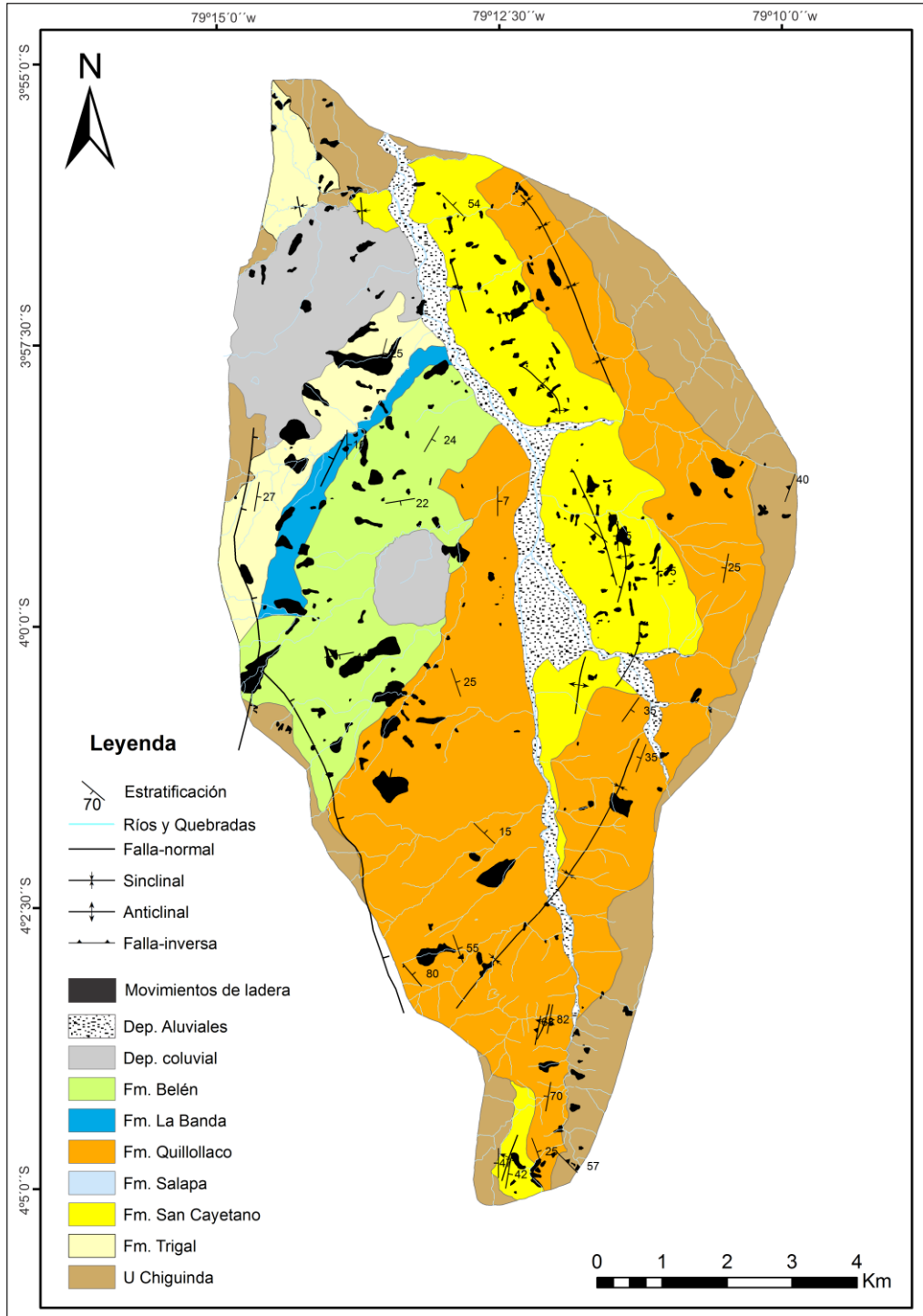


Figura 76. Mapa de formaciones geológicas y movimientos de ladera inventariados.

La figura 77 representa el porcentaje de área ocupada por cada formación geológica, donde se evidencia que la formación Quillollaco es la que predomina con un 38%, luego está la formación San Cayetano, y la Unidad Chiguinda con un 15% cada una. Mientras que la figura 78 indica que el mayor porcentaje de área movida está en la formación Quillollaco con un 28,4% seguido de la formación Belén con el 24,2% y la formación Trigal y San Cayetano con el 15 y 14% respectivamente.

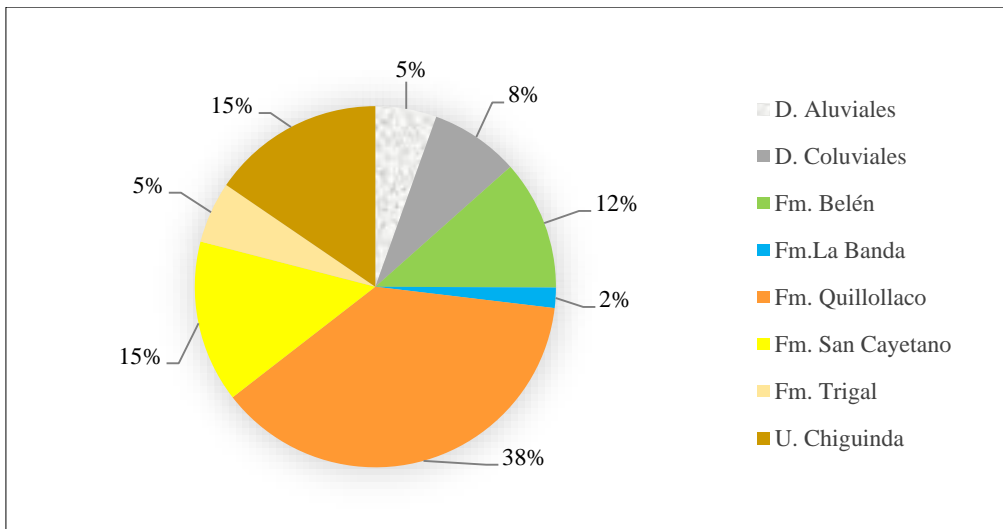


Figura 77. Distribución porcentual del área por formación geológica.

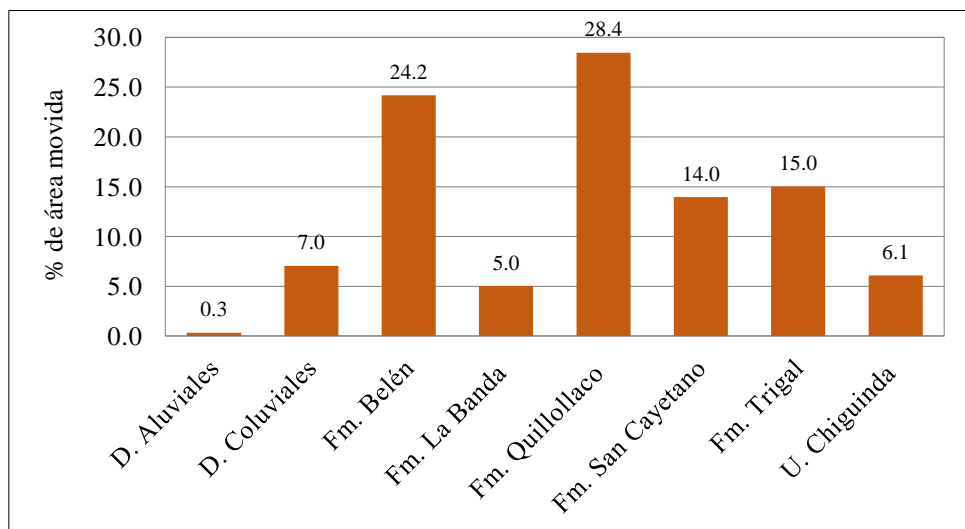


Figura 78. Distribución porcentual de área movida por formación geológica.

Mapa de distancia a estructuras geológicas

La cuenca de Loja tiene una geometría aproximadamente romboidal, elongación N-S y una deformación asimétrica. Estudios realizados por Kennerley y Almeida (1975) proponen que la Cuenca de Loja es una estructura sinforme con una falla vertical en el eje central de la cuenca. Hungerbühler et al. (2002) proponen que la cuenca corresponde a una estructura de semi-graben N-S alargada, relacionada con una falla mayor en su lado oriental, que posteriormente sufrió una inversión tectónica. Sin embargo, estudios recientes realizados por Tamay et al. (2016), señalan que el depocentro de la Cuenca de Loja está alineado N-S con espesores sedimentarios de 500 a 1.200 m desplazados hacia el este de la cuenca. La parte oriental de la cuenca se ve afectada por los pliegues apretados que pueden desarrollar estructuras volcadas y fallas inversas con buzamiento hacia el este (Figura 79).

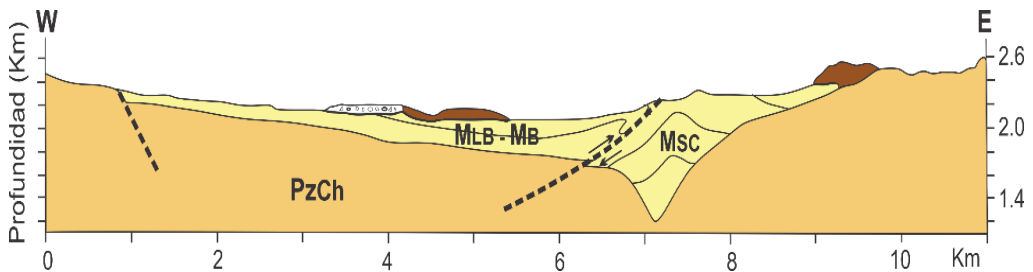


Figura 79. Corte geológico de la cuenca de Loja. Tamay et al. (2016)

Estos resultados indican que la cuenca de Loja estuvo principalmente afectada por la compresión de E-W, con predominancia de la vergencia hacia el este. Además, las fallas normales locales ocurren en el borde SW de la cuenca sugiriendo una etapa tardía de extensión. La figura 80 representa el mapa de estas fallas con clases divididas por distancia a las mismas.

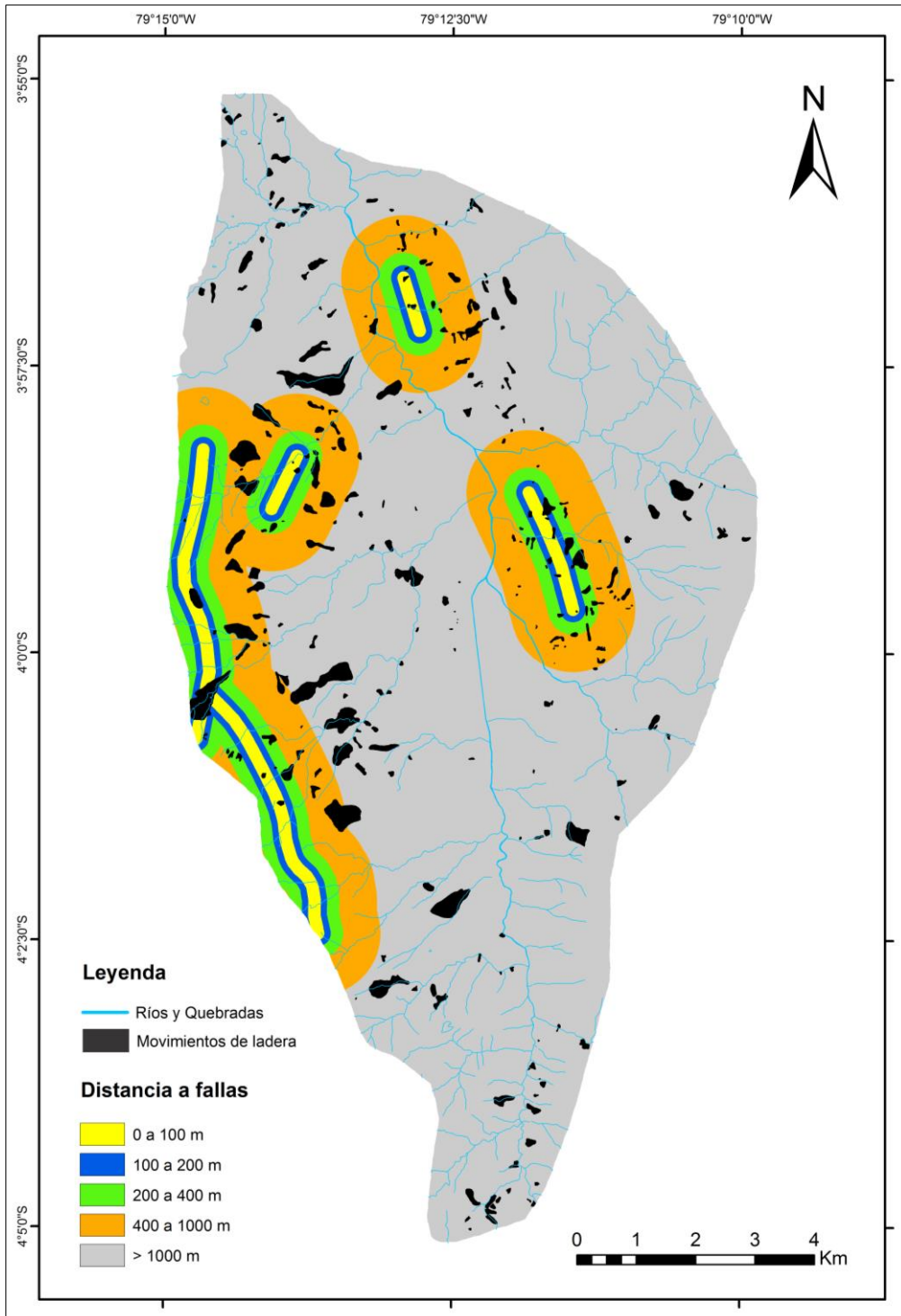


Figura 80. Mapa de distancia a fallas geológicas y movimientos de ladera.

La figura 81 muestra que la mayor cantidad de área se concentra en el rango de distancia a las fallas mayor a 1.000 m con un 73%, seguido del rango de 400 a 1.000 m con un porcentaje del 16%. Mientras que la figura 82 refleja que la mayor cantidad de área movida está en el rango mayor a 1.000 m con un porcentaje de 59,2% que igualmente es el que ocupa mayor área de terreno, luego está el rango de 400 a 1.000 m con un 26,3% de área movida.

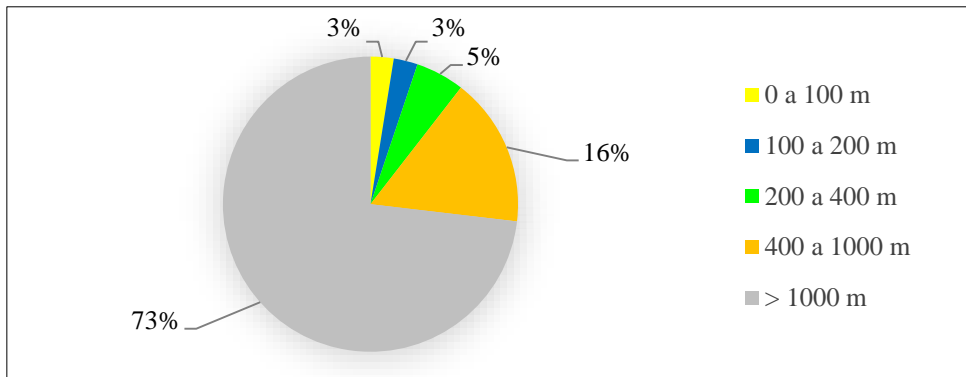


Figura 81. Distribución porcentual del área por rango de distancia a las fallas.

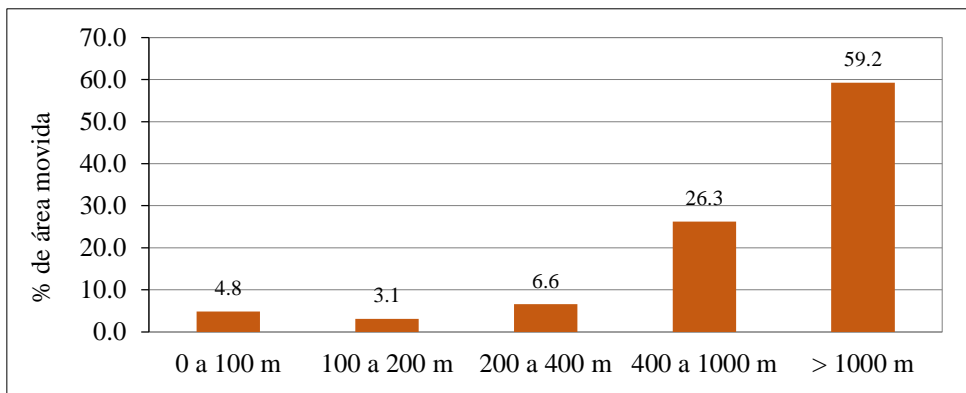


Figura 82. Distribución porcentual de área movida por rango de distancia a las fallas.

4.1.2.4 Mapa litológico

Sobre la base topográfica a escala 1:5.000 de la cuenca de Loja, generada para este fin se ha procedido a realizar la cartografía litológica de campo del área objeto de este estudio (Figura 83). Se han agrupado algunas litologías, según la similitud litológica de los materiales independientemente de la formación

geológica a la que corresponda. En este caso, se ha evaluado en base a observaciones directas de campo.

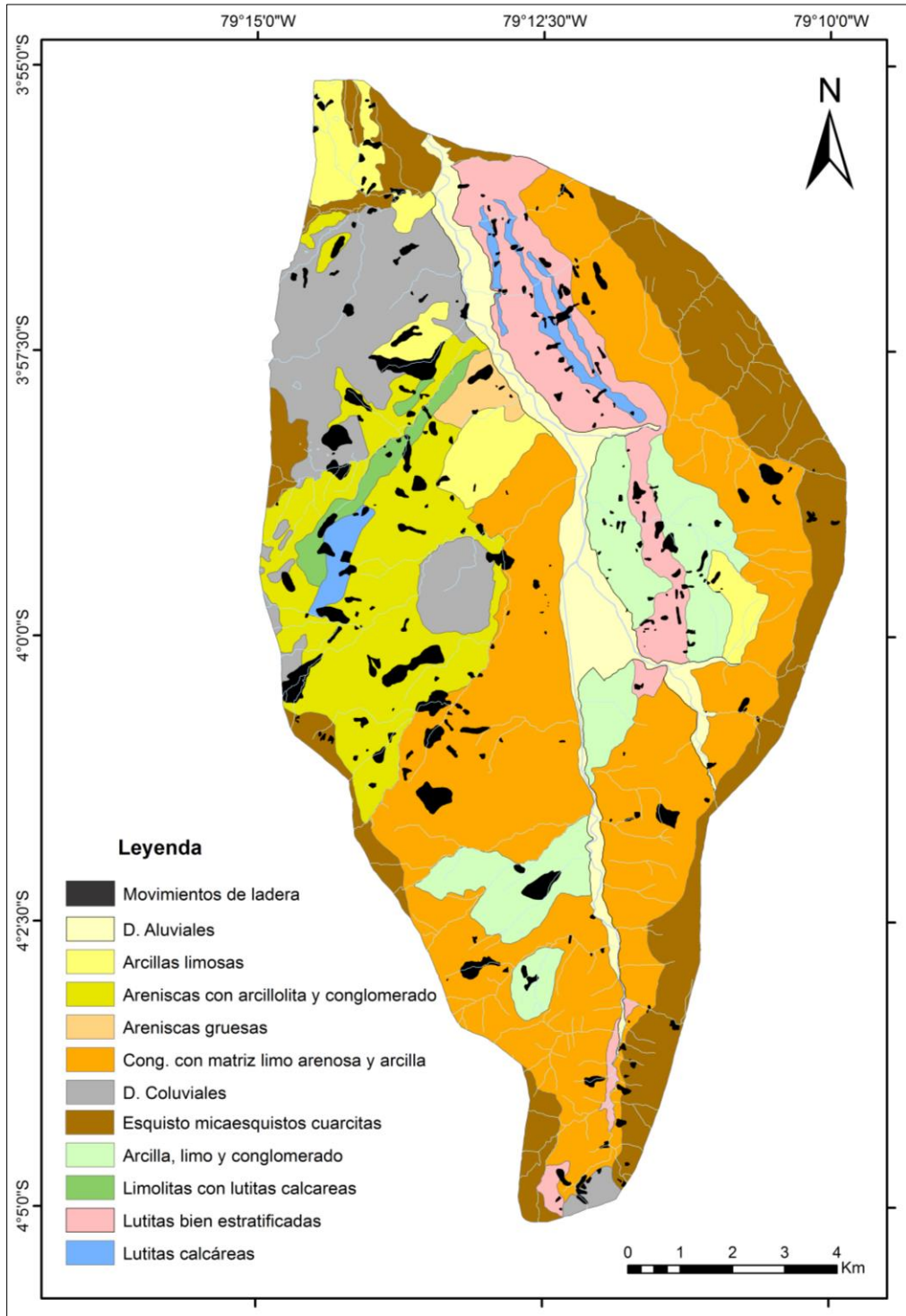


Figura 83. Mapa litológico y movimientos de ladera

Las unidades o complejos litológicos diferenciadas y cartografiadas en el mapa litológico, se describen a continuación.

Depósitos aluviales.- Esta unidad litológica corresponde a los materiales arrastrados y depositados por corrientes de agua. Constituidos por material pétreo como: cantos, gravas, arenas, limos y arcillas, el diámetro de los cantos es variable pudiendo llegar hasta los 45 cm y en algunas casos hasta 1 m (Figura 84). Estas terrazas forman zonas más o menos dispuestas a lo largo de los ríos principales. No se han identificado movimientos de ladera sobre estos materiales.



Figura 84. Afloramientos de terrazas aluviales

Arcillas limosas.- Son unidades constituidas en su mayor parte por arcillas y en algunas ocasiones con algún componente limoso, que incluso en algunos sectores son destinados como canteras de explotación de arcilla para el uso en cerámica (terracota) (Figura 85). Son altamente plásticas y reportes de ensayos de suelos las clasifican como CH y CL. Generalmente su origen a veces está determinado por la meteorización de lutitas preexistentes y en algunos sectores por la pérdida de estratos de conglomerados que las recubrían.



Figura 85. Afloramientos de arcillas limosas

Areniscas con arcillolita y lentes de conglomerados.- Se caracteriza esta unidad por estar constituidas principalmente de arenisca poco cementada (SM–SC), con intercalaciones de estratos de arcillolitas (Figura 86), con presencia de lentes de conglomerados. Son materiales muy favorables para la formación de movimientos de ladera.



Figura 86. Afloramientos de lutitas, arenas y conglomerados.

Areniscas gruesas con arcillas y conglomerados.- están constituida por arenas gruesas (SM), limos y arcillas (Figura 87) que son las que le dan un estado medio de cementación, que tienden a erosionarse fácilmente.

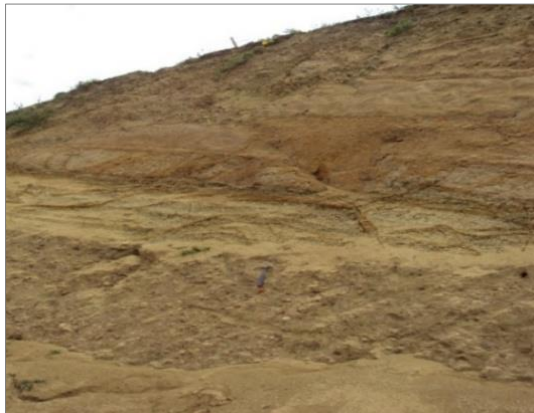


Figura 87. Afloramiento de arenas gruesas, limos, arcillas y conglomerados en la base.

Conglomerados con matriz limo-arenosa y arcillas. - Corresponde a rocas sedimentarias, cuyos clastos son sub-redondeados de 1 a 15 cm de diámetro, constituídos principalmente de esquistos y cuarcitas. Se encuentran altamente cementados por una matriz silíceo-arcillosa e incluso carbonatos en algunas zonas y en otras existe intercalaciones de limo y arcilla en capa mayores a 1 m

de espesor (Figura 88). Estos materiales forman taludes con pendientes muy altas. La presencia de capas de arcillas color grisáceo convierten a estas litologías muy susceptibles a los movimientos de ladera.



Figura 88. Disposición de los conglomerados en los cuales se observa intercalaciones de areniscas y capas de arcillas grisáceas.

Depósitos coluviales.- Son materiales clásticos con una disposición totalmente desorganizada cuya matriz está formada por material fragmentado más pequeño con baja coherencia y consistencia, su origen corresponde a los materiales metamórficos desprendidos por efectos de la gravedad y de la acción del agua. Por su constitución son materiales altamente permeables y muy favorables para que se generen procesos erosivos especialmente en forma de surcos y tubificaciones (Figura 89).



Figura 89. Afloramientos de material coluvial, donde se aprecia muy bien el proceso erosivo.

Esquistos y cuarcitas.-

Corresponden a rocas metamórficas tipo esquistos, micaesquistos y cuarcitas principalmente (Figura 90). En algunos sectores se presenta alteración media. Son parte del basamento de la cuenca sedimentaria de Loja.



Figura 90. Esquistos alterados

Arcillas, limos y conglomerados.- esta unidad se caracteriza por presentar materiales litológicos del tipo de arcillas, limos, algunas limolitas y conglomerados (matriz arcillosa) en forma inter-estratificada con potencias de hasta 2 m en cada estrato de estas litologías (Figura 91). Se diferencia de la unidad 5 y 7 porque tienen mayor presencia de arcilla.



Figura 91. Afloramientos de arcillas, limos y conglomerados presentes en forma interestratificada.

Limolitas con lutitas calcáreas.- Se presenta alternando entre lutitas calcáreas y limolitas con areniscas pobremente cementadas, dispuestas en forma estratificada y altamente fracturadas (Figura 92), que junto a la alteración superficial que sufren estos materiales los convierten en litologías muy frágiles, en otras palabras, fácilmente disgregables.



Figura 92. Disposición de las lutitas calcáreas intercalada con limolitas y arenisca.

Lutitas bien estratificadas.- corresponde a lutitas de color crema a café claro a oscuro que se encuentran muy bien estratificadas (Figura 93), que es el criterio que se tomó para diferenciar esta unidad litológica con respecto a la unidad 10. Forma taludes con pendientes moderadas a altas llegando sus estratos a tener inclinaciones de 25° a 65° hacia el SW y NE.



Figura 93. Afloramientos de lutitas en las que se aprecia su buena estratificación.

Lutitas Calcáreas.- También conocidas como **margas**, están formadas por una mezcla de arcillas con materiales calizos, y otros minerales como cuarzo o mica y trazas de materiales orgánicos. En la zona aparece muy estratificadas (Figura 94) con inclinaciones de 30° a 40° hacia el NE. Son estratos muy resistentes y competentes lo que permite deducir que tienen un comportamiento geomecánico muy estable.



Figura 94. Disposición de las lutitas calcáreas, sector de Belén.

La figura 95 indica que el área de estudio está ocupada principalmente por las siguientes unidades litológicas: “conglomerados con matriz limo-arenosa y arcilla (34%), esquistos micaesquistos y cuarcitas (15%) y areniscas con lutitas y conglomerados (12%). Estas 3 unidades representan el 56% del total de área estudiada. Las litologías de menor presencia son las areniscas gruesas y limolitas con lutitas calcáreas, ambas con el 1%. La figura 96 evidencia que la litología de “areniscas con arcillolitas y lentes de conglomerados” es la que tiene mayor porcentaje de área movida con el 32,4%, seguida de “conglomerados con matriz limo-arenosa y arcillas” con el 23%, coluviales con el 10% y lutita estratificadas con el 8,5% y también las intercalaciones de arcilla, limo y conglomerados con 8,2% entre las más representativas. Igualmente si representamos en la misma figura el porcentaje de movimientos de ladera inventariados (barras color gris) con cada clase de litología, se evidencia que la mayor cantidad de movimientos de ladera ocurren en los “conglomerados con matriz limo-arenosa y arcillas” con un 23%, luego tienen mayor presencia en las “lutitas bien estratificadas” con un 20,2%, seguido de las “areniscas con arcillolitas y lentes de conglomerado” con el 15,4%. Mientras que las litologías que tienen menor presencia de movimientos de ladera son los “aluviales” con el 0,3% y 0,7% considerando el área movida o movimientos de ladera respectivamente.

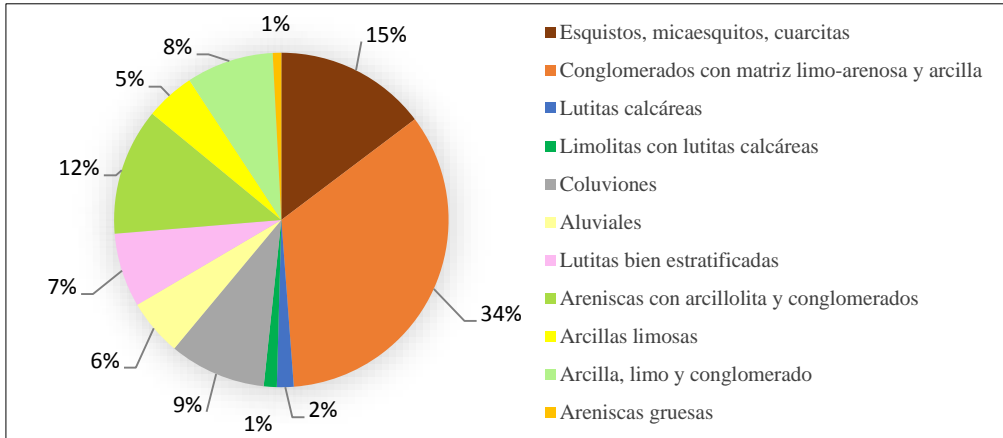


Figura 95. Distribución porcentual de las diferentes unidades litológicas.

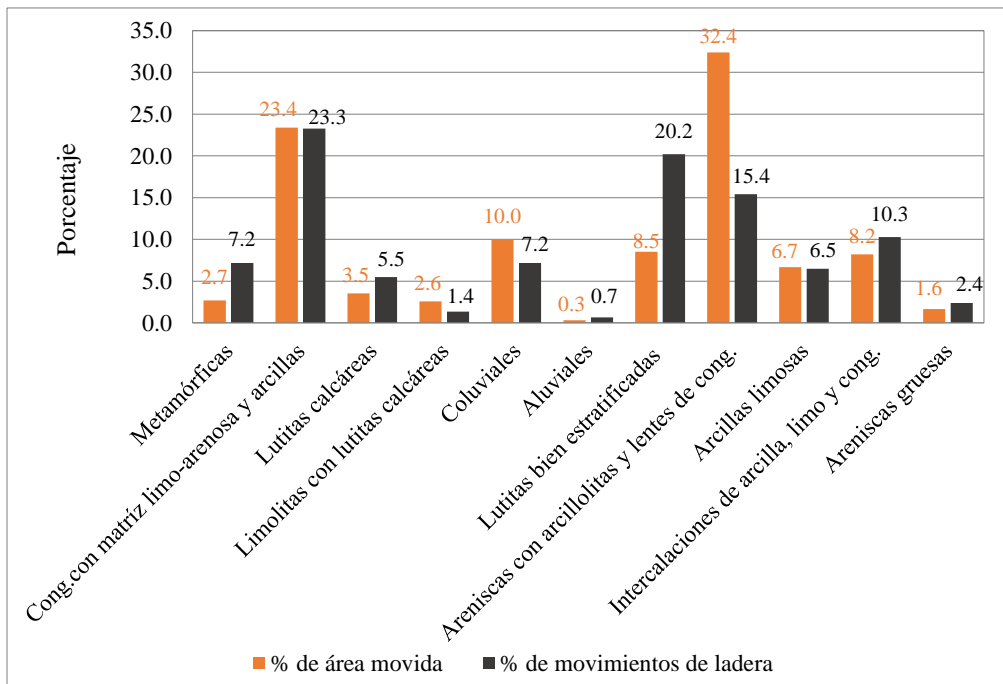


Figura 96. Distribución porcentual de área movida por unidad litológica, y distribución de movimientos de ladera por litología.

Como se puede evidenciar de la correlación de los movimientos de ladera con la variable litología se observa que generalmente son las “areniscas con arcillolitas y lentes de conglomerados” y los “conglomerados con matriz limo-arenosa y arcillas” donde se generan la mayor cantidad de movimientos de ladera. Esto se debe a la presencia de capas de arcillas grises interestratificadas en esos conglomerados, las cuales al tener una plasticidad de media a alta (como

se demuestra en el apartado 3.2) y en interacción con el agua contribuyen a la generación de los movimientos de ladera, como se lo indica en la figura 97. Igualmente un proceso similar ocurre con las litologías de areniscas con arcillolitas y lentes de conglomerado. Mientras que la litología de lutitas bien estratificadas también contribuye a generar bastantes movimientos de ladera debido a la alta fisibilidad y fracturación de las lutitas.



Figura 97. Presencia de conglomerados con capas de arcillas color grisáceo, que contribuyen a la generación de los movimientos de ladera, y por tanto muy susceptibles a este tipo de eventos.

4.2 METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD

El análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera consiste en la estimación cualitativa o cuantitativa de la distribución espacial futura de los

movimientos de ladera, considerando los diferentes tipos y magnitudes (volumen o área). Generalmente se busca dar respuesta a las cuestiones de dónde, qué tipos de movimientos y cómo podrían ocurrir en el futuro (Aleotti and Chowdhury 1999). Matemáticamente, la susceptibilidad se define como la probabilidad espacial de ocurrencia de roturas dado un conjunto de condiciones geoambientales (Guzzetti et al. 2005). Así conociendo la relación entre los factores condicionantes y los procesos de los movimientos de ladera es posible determinar las áreas potenciales donde podrían ocurrir o reactivarse futuros movimientos de ladera (Hutchinson 1995). Por tanto, para este análisis se incorporan los mapas de factores condicionantes y dos mapas de inventario de diferentes periodos de tiempo (Figura 98): El mapa llamado INV.1 (muestra de entrenamiento) utilizado para la generación del modelo de susceptibilidad y el mapa de INV.2 (muestra de test o de validación).

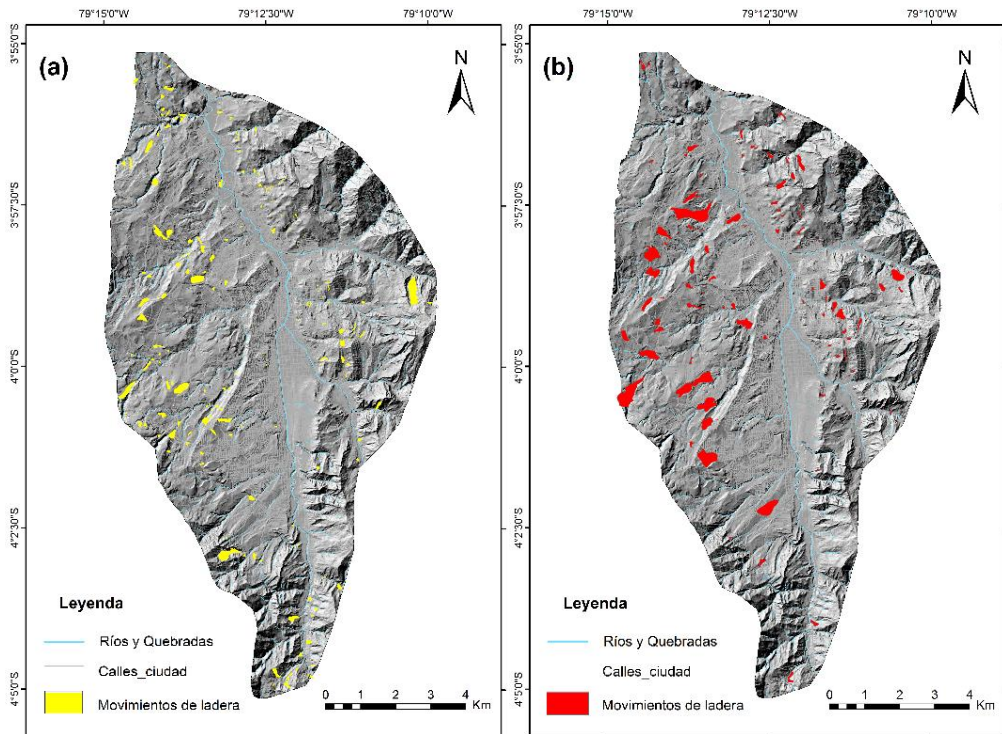


Figura 98. Mapa de inventario de movimientos de ladera a) INV. 1 “muestra de entrenamiento” b) INV.2 “muestra test o de validación”

Como se ha explicado en el apartado 1.3.4, para la estimación de la susceptibilidad existen varios métodos. Para el caso de esta investigación se ha aplicado y comparado dos métodos estadísticos-probabilísticos como son: el método de la “**Matriz**” (Irigaray 1995) validado positivamente en el entorno de la Cordillera Bética (Irigaray 1995; Fernández et al. 2000; Irigaray et al. 2007) y el método de la relación de probabilidades, o su terminología en inglés “**Likelihood ratio**”, (Chung y Fabbri 1999; Chung y Fabbri 2005; Chung 2006), que ha sido aplicado satisfactoriamente en diversos ámbitos de las Ciencias de la Tierra y específicamente en movimientos de ladera (Remondo, 2003; Zezere et al., 2004; Lee y Talib, 2005; Chung y Fabbri, 2008; Carrara et al. 2008).

4.2.1 Modelo de susceptibilidad aplicando el método de la relación de probabilidades.

Es un método probabilístico que se fundamenta en las Funciones de Favorabilidad (FF). Chung y Fabbri (1993) desarrollaron un modelo matemático de análisis de datos espaciales para construir modelos predictivos (como los mapas de susceptibilidad) que denominaron Funciones de Favorabilidad (FF). El principio básico aplicado a la predicción de futuros movimientos de ladera, es que es posible construir una función que estime para cada punto del espacio (píxel) la favorabilidad (probabilidad, propensión, susceptibilidad, etc.) de que sea afectado por un deslizamiento en el futuro, dado que en ese lugar concurren una serie de factores condicionantes.

Así, si representamos el área de estudio mediante una matriz de celdas o raster, podemos definir la siguiente función para cada píxel p:

$$f(\text{MLp: dados los } m \text{ factores causales } V_k(p)=1, \dots, m)$$

Donde:

MLp: “el píxel **p** quedará afectado por un movimiento de ladera (ML) futuro de un determinado tipo”

Vk(p): valor de la variable **k** en el píxel **p**

Las variables que condicionan la aparición de los movimientos de ladera son de distinta naturaleza, fundamentalmente cuantitativas o numéricas (aproximadamente continuas) y cualitativas o categóricas. Desde un punto de vista espacial, también pueden ser continuas, discretas, poligonales, lineales o puntuales. Para que estas variables heterogéneas puedan ser tratadas matemáticamente es preciso que todas ellas estén representadas por valores numéricos por medio de los cuales puedan ser comparadas, y al final integrarse en un mapa o modelo también numérico. Una solución al problema consiste en transformar, mediante una función, las variables, tanto cuantitativas como categóricas, en valores de favorabilidad. Esta favorabilidad se puede expresar como la probabilidad relativa de que un proceso actúe u ocurra en cada píxel de la zona analizada. Esto, permite ordenar los píxeles analizados en función de su probabilidad relativa.

Originalmente, las funciones de favorabilidad se calculaban a partir de variables categóricas, utilizando un esquema basado en “unidades de condición única”, en las que se computaban los valores de favorabilidad mediante unos estimadores fáciles de obtener a partir de análisis bivariado, y que posteriormente se integraban mediante una función multivariable. Así, la probabilidad de encontrar un movimiento de ladera en la zona de estudio podría estimarse a partir de la relación:

$$\text{Área de ML} / \text{Área}$$

Y la probabilidad de encontrar una determinada unidad o clase definida en un mapa de factores condicionantes, podría ser:

$$\text{Área de la clase} / \text{Área total}$$

Y la probabilidad de encontrar una dolina en una determinada clase de una determinada variable se podría estimar mediante la siguiente expresión (Chung and Fabbri 1993):

$$1 - [1 - (1/\text{Área de la clase})]^{\text{Área de ML en la clase}}$$

Gracias a una mayor capacidad de computación y memoria de los ordenadores convencionales, las nuevas aplicaciones informáticas permiten generar modelos predictivos basados en FF con facilidad. El procedimiento seguido para generar este tipo de funciones (FF) es el siguiente:

Supongamos una función \mathbf{g} para cada píxel \mathbf{p} (\mathbf{g}_p), donde existe una combinación de \mathbf{m} factores condicionantes ($\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_m$), entonces:

El valor de la función $\mathbf{g}_p = \mathbf{1}$, si en el píxel \mathbf{p} existen movimientos de ladera, así como los factores condicionantes ($\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \dots, \mathbf{c}_m$), y $\mathbf{g}_p = \mathbf{0}$, si en el píxel \mathbf{p} no existen movimientos de ladera, dada la combinación de factores condicionantes ($\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \dots, \mathbf{b}_m$).

Por tanto, la función \mathbf{g}_p ($\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \dots, \mathbf{c}_m$) representara un nivel relativo de susceptibilidad del píxel \mathbf{p} dados los \mathbf{m} valores ($\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \dots, \mathbf{c}_m$) en el píxel.

Si los m valores (c_1, c_2, \dots, c_m) del píxel p presentan unas condiciones (geomorfológicas, litológicas, hidrológicas, etc.) más “propensas” o “susceptibles” a los movimientos de ladera que las del píxel q (d_1, d_2, \dots, d_m), entonces:

$$g_p(c_1, c_2, \dots, c_m) > g_q(d_1, d_2, \dots, d_m)$$

En consecuencia, a partir de los m factores condicionantes y de los movimientos de ladera existentes debería ser posible estimar la función de favorabilidad g_s (e_1, e_2, \dots, e_m) para cualquier píxel del área de estudio. Si las suposiciones de partida son ciertas, entonces el modelo construido con la citada función de favorabilidad pronosticará adecuadamente los movimientos de ladera del futuro.

Se pueden generar funciones de favorabilidad mediante diferentes funciones matemáticas enmarcadas en la teoría de probabilidades (Bayes, Factor de Certidumbre, Pesos de evidencia, función de relación de probabilidades, etc.), la teoría de los conjuntos difusos de Zadeh (funciones de pertenencia difusa), etc., cuya utilidad ya ha sido puesta de manifiesto en trabajos anteriores (Chung y Fabbri, 1998; Chung y Keating, 2002; Clerici et al., 2002; Remondo et al. 2003b).

FF interpretada como una relación de probabilidades (likelihood ratio)

Partimos de la base de que para que una variable condicione la distribución espacial de movimientos de ladera, en un área de estudio que está dividida en dos subzonas, una con movimientos (X) y otra sin movimientos (\bar{X}), la distribución de frecuencias de los valores de esa variable en X tiene que ser diferente a la distribución de frecuencias en \bar{X} . Por ejemplo, si estudiamos el uso del suelo en el que aparecen movimientos de ladera y observamos que la mitad de ellos afectan a terrenos de pasto y la otra mitad a terrenos urbanos, pero el terreno de pasto solo ocupa un 20% de la superficie total y el resto es urbano,

podemos considerar el uso del suelo como un variable condicionante y al pasto como una clase favorable a la aparición de movimientos de ladera. Esto es así porque la zona de pasto tiene una mayor proporción de movimientos de ladera en relación con su área que los terrenos urbanos.

Teniendo en cuenta lo anterior, se puede construir una función a partir del cociente entre las dos funciones de distribución empírica (Figura 99). Esta función, denominada función de relación de probabilidades (λ) o likelihood ratio (Kshirsagar 1972; Press 1972; Cacoullous 1973), se puede expresar de la siguiente forma:

$$\lambda (Variable) = \frac{f\{variable|X\}}{f\{variable|\bar{X}\}}$$

Donde:

$f\{variable|X\}$ es la función de distribución empírica del área afectada por movimientos de ladera.

$f\{variable|\bar{X}\}$ es la función de distribución empírica del área no afectada por movimientos de ladera.

Puesto que el proceso estudiado está condicionado por más de una variable, es necesario definir una función de relación de probabilidades basada en todo un conjunto de variables (función multivariable). Las variables utilizadas para realizar estos análisis pueden ser de naturaleza numérica, aproximadamente continua (p.ej. distancia a fallas) o categórica (p.ej. mapa litológico). Para combinar esa información, en este trabajo se ha llevado a cabo la categorización de las variables continuas en varias clases.

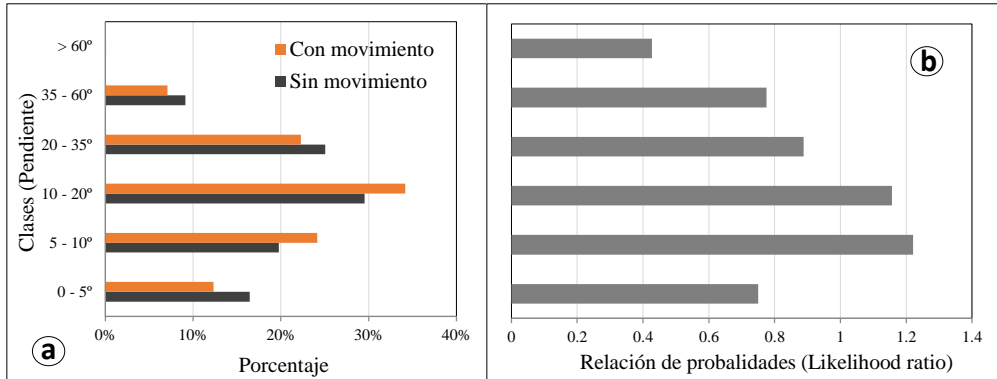


Figura 99. a) La distribución empírica de las frecuencias de la variable categórica "pendiente" para las áreas con movimiento y sin movimiento. Se observa que las clases de 5° a 10° y de 10° a 20° son las que son más proclives a sufrir movimientos de ladera. Esto sería coherente con las observaciones realizadas en el apartado 4.1.1.2. La variable es a priori significativa porque la distribución de área con movimiento y sin movimiento es diferente. Si al contrario dicha distribución fuese similar para todas las clases la variable no contribuirá en absoluto a la predicción, es decir no tendría capacidad discriminante. **b)** Relación de probabilidades para cada clase. De esta gráfica se puede deducir que las clases citadas presentan una mayor propensión a sufrir deslizamientos ya que la ocurrencia de deslizamientos que se observa es mayor de la esperada con respecto al área que ocupa la clase (Likelihood ratio > 1) mientras que en las demás clases se observa que aparecen menos deslizamientos de los esperados (Likelihood ratio < 1).

Así, dadas las m variables (v_1, v_2, \dots, v_m), la función de relación de probabilidades descrita anteriormente puede formularse:

$$\lambda(v_1, v_2, \dots, v_m) = \frac{f\{(v_1, v_2, \dots, v_m)|X\}}{f\{(v_1, v_2, \dots, v_m)|\bar{X}\}}$$

Si consideramos que entre las m variables (v_1, v_2, \dots, v_m) tenemos variables categóricas

(x_1, x_2, \dots, x_k) y variables continuas (y_1, y_2, \dots, y_h) y suponemos que son independientes entre sí, entonces:

$$\lambda(x_1, \dots, x_k, y_1, \dots, y_h) = \frac{f\{(x_1, x_2, \dots, x_k)|X\}}{f\{(x_1, x_2, \dots, x_k)|\bar{X}\}} \cdot \frac{f\{(y_1, y_2, \dots, y_h)|X\}}{f\{(y_1, y_2, \dots, y_h)|\bar{X}\}}$$

De lo que se deduce que:

$$\lambda(x_1, \dots, x_k, y_1, \dots, y_h) = \lambda(x_1, \dots, x_k) \cdot \lambda(y_1, \dots, y_h)$$

Suponiendo la independencia entre las variables de un mismo tipo tenemos que:

$$\lambda(x_1, \dots, x_k) = \lambda(x_1) \dots \lambda(x_k)$$
$$\lambda(y_1, \dots, y_h) = \lambda(y_1) \dots \lambda(y_h)$$

Para las variables categóricas (x_1, x_2, \dots, x_k) y variables continuas categorizadas (y_1, y_2, \dots, y_h), se puede calcular una función λ para cada uno de los k mapas, a partir de una relación de probabilidades para cada categoría o clase de cada mapa [$\lambda(y_1) \dots \lambda(y_h)$]. Esa relación de probabilidades puede estimarse de la siguiente forma:

$$\tilde{\lambda}_p(x_i) = \frac{\text{Proporción de píxeles con mov dentro de la clase } x_i \text{ del mapa } i}{\text{Proporción de píxeles sin mov dentro de la clase } x_i \text{ del mapa } i}$$

La estimación final de la función de relación de probabilidades para el conjunto de variables categóricas $\lambda(x_1, \dots, x_k, y_1, \dots, y_h)$, se puede obtener a partir de la multiplicación del valor del likelihood ratio como se indica en la siguiente expresión:

$$\hat{\lambda}(x_1, \dots, x_k, y_1, \dots, y_h) = \tilde{\lambda}(x_1, \dots, x_k) \cdot \tilde{\lambda}(y_1, \dots, y_h)$$

Mediante la anterior formulación, desarrollada por Chung y Fabbri (2005), se obtiene una función de relación de probabilidades para todo un conjunto de variables de diferente naturaleza. Esta es una función de favorabilidad que describe para cada píxel su grado de favorabilidad o susceptibilidad a movimientos de ladera, teniendo en cuenta todos los factores condicionantes considerados. Una descripción más exhaustiva de todo el procedimiento se puede encontrar en Chung (2006).

La figura 100 esquematiza el proceso metodológico utilizado con el software ArcGIS 10.1 para generar el mapa de susceptibilidad con la aplicación del método Likelihood ratio.

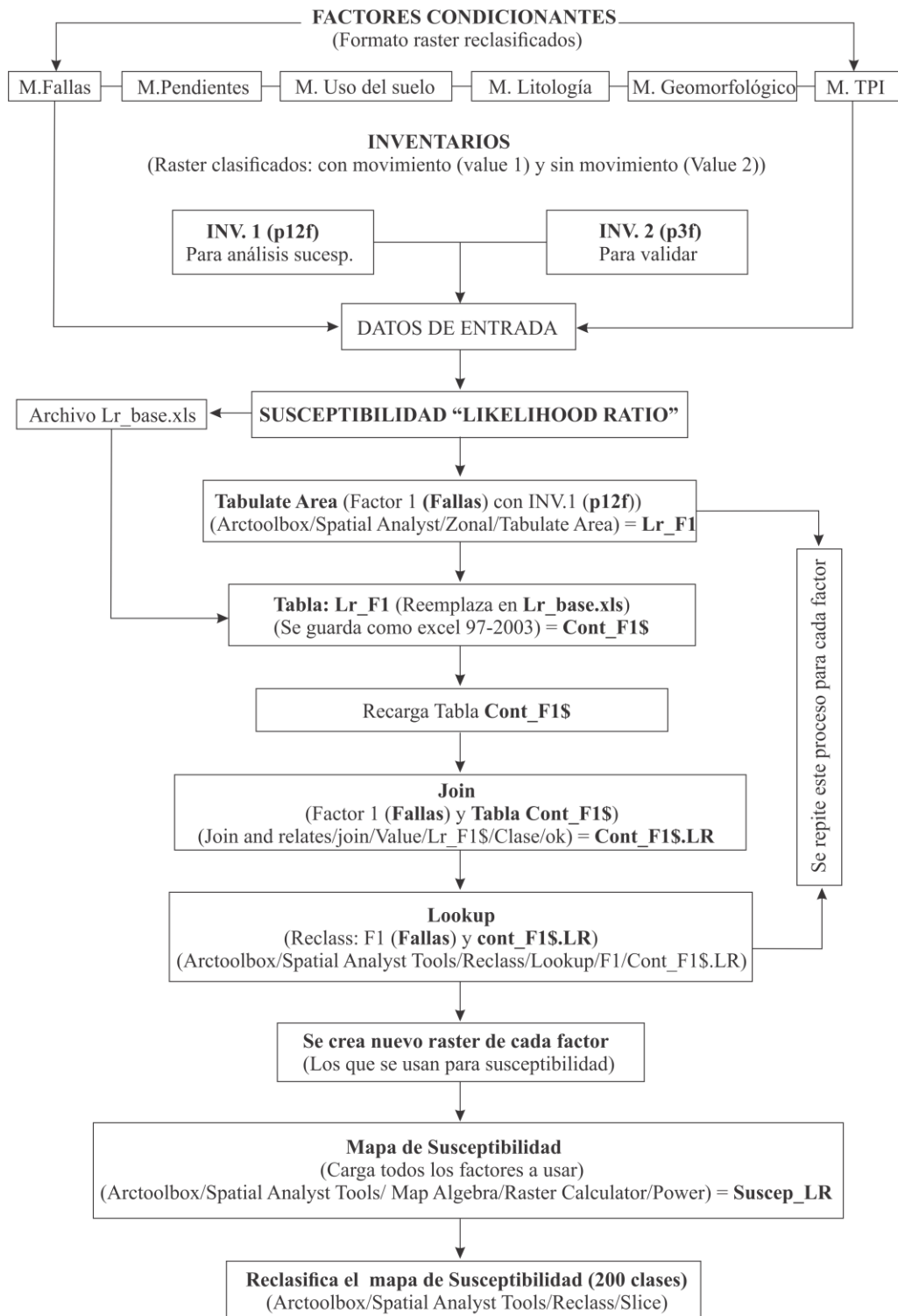


Figura 100. Esquema metodológico del método Likelihood ratio (Chung 2006).

4.2.2 Modelo de susceptibilidad utilizando el método de la “Matriz”

El método de la matriz (DeGraff y Romesburg 1980) es un método cuantitativo (estadístico bivalente) para establecer un índice de inestabilidad en una determinada zona. No es capaz de predecir la susceptibilidad a los movimientos de ladera en términos de probabilidad absoluta; sin embargo, permite evaluar la inestabilidad potencial relativa en una región amplia, utilizando una serie de valores cuantificables (Irigaray 1995). Una vez seleccionado el conjunto de factores que condicionan la aparición de los movimientos de ladera, se construye una matriz, de modo que cada una de sus celdas representa cada una de las combinaciones de las clases de los factores considerados. A partir del inventario de movimientos de ladera, se calcula el área afectada por movimientos en cada combinación de factores. Con eso se construye la *matriz de movimientos de ladera* (Figura 101a). Por ejemplo, en el caso de esta figura, hay 90 km² afectados con movimientos con la litología “C”, pendiente “M” y exposición “Z”.

De forma análoga se construye la *matriz de la zona de estudio*, que representará el área total de cada combinación de factores (figura 101b). En el ejemplo de esta figura la combinación (C, M, Z) tiene una superficie de 710 km². Naturalmente, todas las combinaciones presentes en la matriz de movimientos estarán incluidas en la matriz de toda la zona.

La matriz de susceptibilidad tiene el mismo número de combinaciones que la matriz de toda la zona (figura 101c). El valor de cada celda de esta nueva matriz se obtiene dividiendo los correspondientes a la matriz de movimientos entre los de la matriz de toda la zona. Todas las combinaciones que no están asociadas a movimientos de ladera se les asigna el valor “0” en la matriz de susceptibilidad; el resto tendrá valores mayor de 0, pudiendo alcanzar el valor 1 (o 100 si lo expresamos en porcentaje) como máximo. En el ejemplo de la figura 101, para

la combinación de litología “C”, pendiente “M” y exposición “Z”, se obtiene un valor de 0,13 que resulta de dividir 90 entre 710.

Los valores de la matriz de susceptibilidad constituyen la proporción de movimientos de ladera respecto al área total y representan la susceptibilidad relativa de cada combinación de factores. Dado que cada punto de la zona estudiada está caracterizado por una determinada combinación de factores, la susceptibilidad relativa en dicho punto será la correspondiente a esa combinación en la matriz de susceptibilidad (Irigaray 1995). La figura 102, representa el proceso metodológico utilizado con el software ArcGIS 10.1 para generar la susceptibilidad en este estudio.

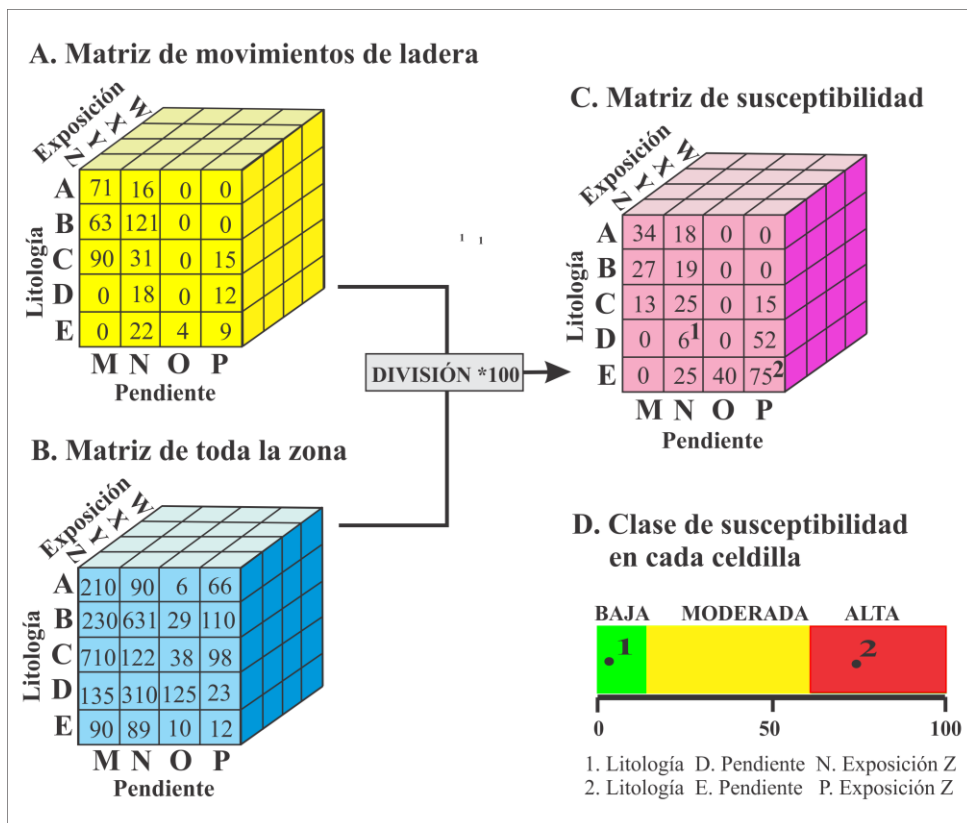


Figura 101. Determinación de la susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante el método de la matriz. Tomado de Irigaray, 1999.

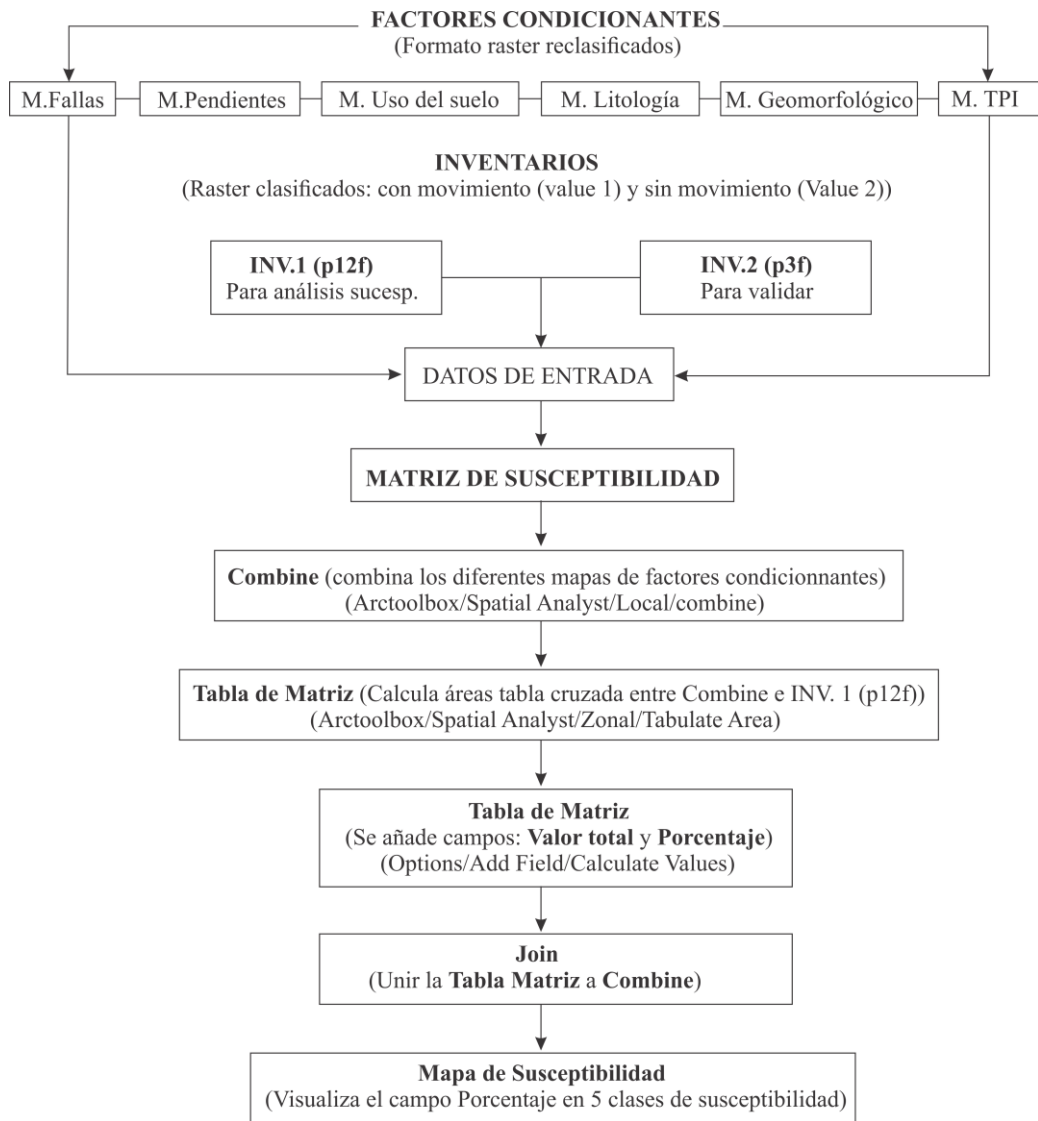


Figura 102. Esquema metodológico del método de la matriz (Irigaray 1999).

4.2.3 Método de evaluación de variables condicionantes y modelos de susceptibilidad

En este trabajo se han evaluado los modelos usando movimientos generados durante un cierto periodo para elaborar el modelo, y movimientos ocurridos en periodos posteriores para su validación. Esta técnica se considera la más fiable

para testar la validez de la predicción realizada (Irigaray et al. 2007). En ese sentido, existen, a parte del citado, otros métodos para llevar a cabo remuestreos con el fin de generar una muestra de entrenamiento y una de validación que se describen brevemente a continuación:

- a) Método espacial en donde se utiliza una zona para construir la función y validarla mediante su aplicación en otra área de iguales características geológico-geomorfológicas (Baeza 1994). Se puede utilizar la misma área subdividiéndola en dos subáreas, una para el análisis y la otra para la validación.
- b) Método aleatorio que selecciona una muestra al azar subdividiéndola en dos submuestras, una para obtener la función discriminante y la otra para validar la función.

Para la evaluación de las variables condicionantes y los modelos se han generado las denominadas curvas de predicción (Prediction-rate curves; Chung y Fabbri 1995; Chung y Fabbri 2003). Se trata de curvas de frecuencia acumulada que expresan cuantitativa y gráficamente la proporción de movimientos de ladera del inventario no utilizada para la generación del modelo (muestra independiente de validación), que se localizan en las zonas con un determinado nivel de susceptibilidad. Este método ha sido frecuentemente utilizado para evaluar modelos de susceptibilidad de deslizamientos y para conocer el potencial de los análisis estadísticos espaciales para la exploración de yacimientos minerales (Fabbri y Chung 2008).

Los valores de susceptibilidad obtenidos mediante cualquiera de los procedimientos descritos anteriormente no pueden considerarse valores de probabilidad espacial absoluta, ni necesariamente se restringen a un rango que oscile entre 0 y 1, sino que deben entenderse como valores relativos indicativos

de la propensión o susceptibilidad a movimientos de ladera. Con tal objeto y, además, para que los diferentes modelos puedan ser comparados, los valores de susceptibilidad se han reclasificado en 200 clases de igual área, asignando a la clase de mayor susceptibilidad el valor 200 y a la de menor el valor 1. De esta forma, cada una de las clases de susceptibilidad representa el 0,5 % del área de estudio.

Para obtener las curvas de predicción (Prediction-Rate Curves, PRC) se cruza, o superpone, el modelo de susceptibilidad, ya reclasificado en 200 clases, con el inventario de movimientos de ladera (INV.2) no utilizado en la elaboración de dicho modelo (muestra independiente de validación). El resultado es una tabla de validación cruzada que contiene las combinaciones entre las diferentes clases de susceptibilidad y los píxeles con y sin movimiento de la muestra de evaluación. En la misma tabla se calcula la proporción de píxeles con movimiento en cada clase. Posteriormente se ordenan las clases de mayor a menor susceptibilidad y se calcula la proporción acumulada de píxeles con movimiento. La figura 103, representa la metodología realizada con el ArcGIS para obtener la validación de los modelos generados.

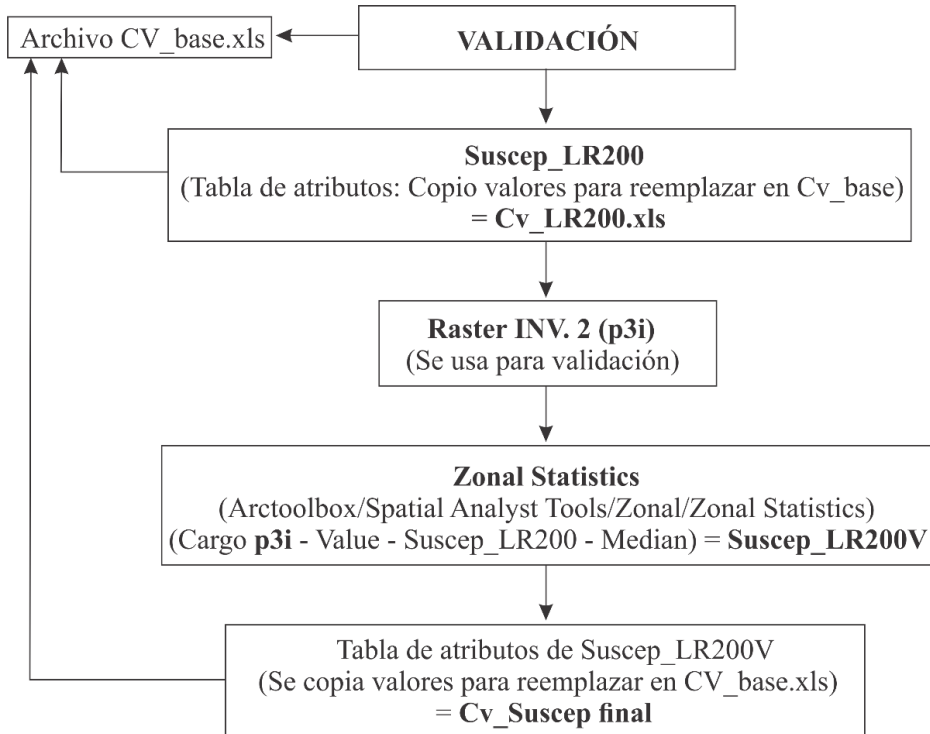


Figura 103. Diagrama metodológica para generar el modelo de validación con la aplicación del ArcGIS.

Para elaborar las curvas de predicción, en abscisas se representa la proporción del área de estudio ordenada desde la más susceptible en el origen a la menos susceptible; y en ordenadas se representa la proporción acumulada de los píxeles con movimiento. La curva de predicción resultante nos indica qué proporción de los píxeles de mayor susceptibilidad es necesaria para predecir una determinada proporción de los píxeles con movimiento de la muestra de evaluación. Cuanto más se aleje la curva de la diagonal (predicción aleatoria), mayor será la capacidad de predicción del modelo.

El área situada por debajo de la curva (Area Under the Prediction-Rate Curve, AUPRC) puede ser utilizada para evaluar cuantitativamente la bondad del modelo con respecto a la evaluación llevada a cabo, sin embargo, la forma o geometría de la curva es de más utilidad si cabe, puesto que proporciona información muy valiosa sobre cómo se comportan las diferentes clases de

susceptibilidad del modelo. En general, cuanto más asintótica y próxima al eje de ordenadas sea la curva en su tramo inicial, tanto mejor discriminará el modelo la zona de mayor susceptibilidad. De forma análoga, cuanto antes alcance la curva la proporción del 100% de los movimientos de ladera, mejor definirá el modelo la zona menos susceptible (no susceptible) y en consecuencia más segura. Se pueden utilizar otros criterios para caracterizar la capacidad predictiva de los modelos y compararlos entre sí.

Para la aplicación de otros métodos de evaluación de modelos predictivos (p.ej. las Matrices de Confusión) es preciso dividir la zona de estudio en dos, una susceptible y otra no susceptible, utilizando un valor umbral. Una ventaja de las curvas de predicción con respecto a dichos métodos es que no dependen de la definición de umbrales (Begueria 2006), acción que puede estar sujeta a criterios poco objetivos.

Para determinar el grado de ajuste de los mapas de susceptibilidad generados, se utiliza un índice de densidad relativa (Baeza 1994; Irigaray 1995; Irigaray et al. 1999; Fernández et al. 2000; Irigaray et al. 2007).

La expresión matemática utilizada para el grado de ajuste ha sido la siguiente:

$$DF_i = \left[\frac{Z_i/S_i}{\sum Z_i/S_i} \right] * 100$$

Z_i : area movilizada en el nivel i (solamente con movimiento)

S_i : area total del nivel i (con movimiento y sin movimiento)

Cuanto mayor sea el porcentaje de celdas con roturas clasificadas en los niveles de susceptibilidad más altos (susceptibilidad alta a muy alta), mejor se considera el ajuste de la función y por tanto la fiabilidad de la misma.

4.3 SELECCIÓN PRELIMINAR DE VARIABLES CONDICIONANTES

En nuestro caso se llevó a cabo un análisis preliminar donde se generaban modelos con una sola variable mediante el método Likelihood ratio que luego se validaban con el método anteriormente expuesto. El proceso de validación permitía ordenar las variables según su capacidad de predicción y conocer cuáles eran las que presentaban un especial potencial para señalar las zonas más susceptibles. Hay que destacar que los resultados no son determinantes dado que variables que a priori solas no poseen una capacidad predictiva alta, luego combinadas con otras pueden ofrecer un buen resultado, aunque no es una norma común.

Además, este análisis preliminar se tomó de referencia también para luego aplicar el método de la matriz aunque los resultados se obtuvieran con otro método. Se llevó a cabo de esa manera dado que este análisis era orientativo y no se buscaba comparar en esta fase los dos métodos. El objetivo real era no tener que llevar a cabo todas las combinaciones posibles de las variables y focalizarse solo en aquellas que a priori eran más prometedoras.

Este análisis inicial arroja los resultados expuestos en la tabla 12, y que se representan individualmente en los esquemas siguientes de la curva de validación por cada variable (Figura 104).

Realizado este análisis de validación de cada factor condicionante, sus resultados permiten seleccionar a los que mejor se ajustan considerando valores mayores de 0,6. Estos factores condicionantes son: ***Fallas, litología,***

geomorfología, curvatura de perfil, curvatura, plana, curvatura estandar, pendiente, uso del suelo e índice de posición topográfica (TPI). Los mismos que se utilizarán para generar los diferentes modelos de susceptibilidad a través de diferentes tanteos entre factores, con la aplicación de los dos métodos elegidos para este estudio. Como se ha indicado, después de validar las combinaciones de estos nueve factores también se probaron combinaciones con otros factores que no habían mostrado tan buena capacidad predictiva.

Tabla 12. Valores de la validación de cada factor condicionante.

No.	Código	Variables condicionantes	AUPRC
1	Gm	Geomorfológico	0,68
2	L	Litología	0,65
3	Tpi	Índice de posición topográfica	0,65
4	U	Uso del suelo	0,64
5	Cs	Curvatura standard	0,63
6	Cpra	Curvatura plana	0,62
7	P	Pendiente	0,60
8	Cpro	Curvatura perfil	0,60
9	F	Fallas	0,59
10	A	Altitud	0,50
11	Twi	Índice de humedad topográfica	0,50
12	G	Geología	0,56
13	O	Orientación	0,56
14	D	Drenaje	0,48

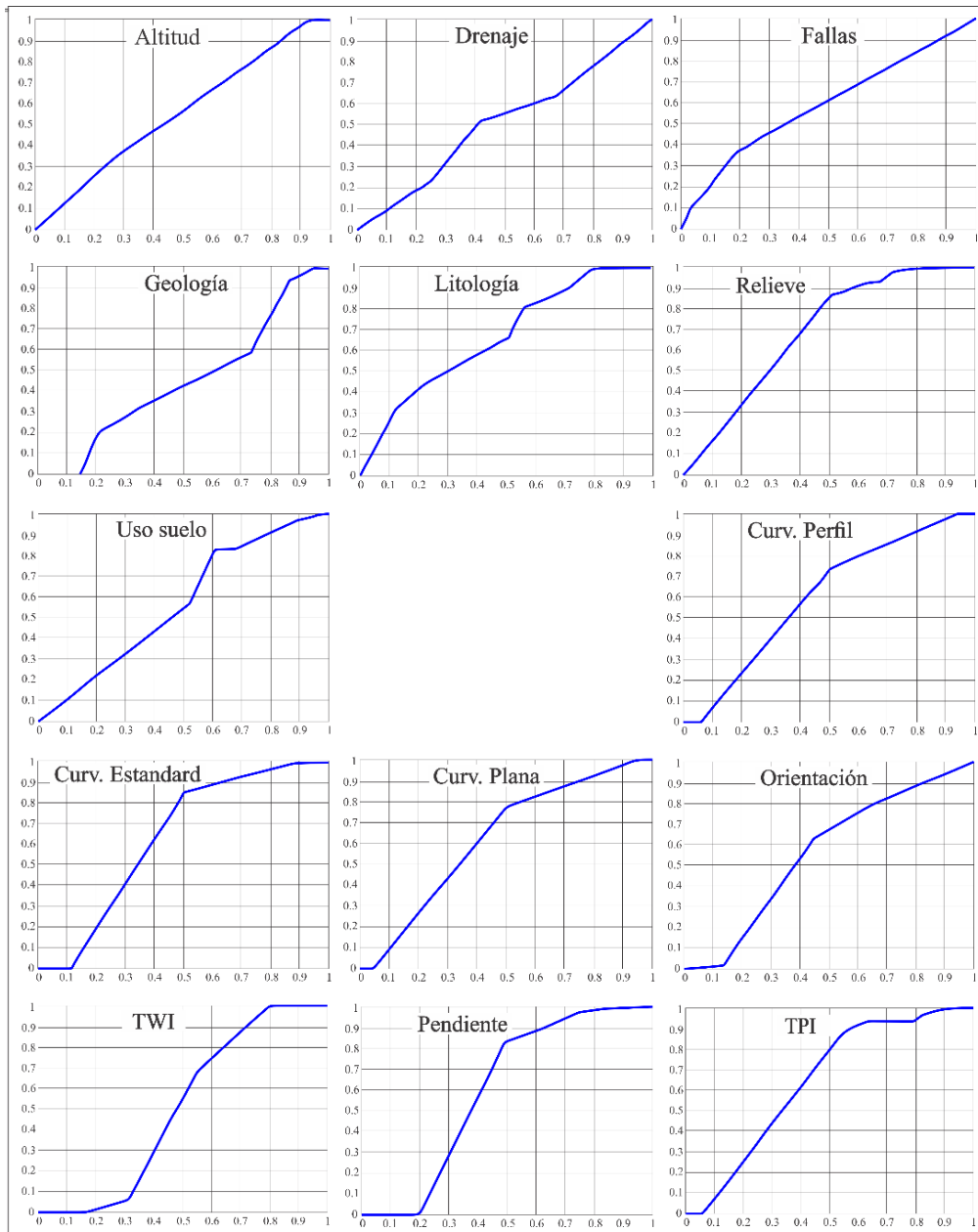


Figura 104. Diagramas de la curva de validación de cada una de las variables condicionantes, utilizando Likelihood ratio.

4.4 RESULTADOS DE MODELOS DE SUSCEPTIBILIDAD

Se generaron 10 modelos de susceptibilidad con diferentes combinaciones de los nueve factores seleccionados, los cuales han sido evaluados independiente y cuantitativamente con el fin de estimar su capacidad de predicción. Los resultados de las evaluaciones permiten seleccionar el mejor modelo de susceptibilidad generado (Tabla 13). El mejor modelo de susceptibilidad resultó de la combinación de seis factores condicionantes (**Litología, pendiente, geomorfología, fallas, tpi, uso del suelo**), cuyo coeficiente de validación (AUPRC) es de 0,77. La figura 105, representa el mapa de susceptibilidad generado.

Tabla 13. Coeficientes de validación de los 10 modelos de susceptibilidad generados con el método Likelihood ratio

Variables utilizadas (Factores condicionantes)	Nombre del modelo de susceptibilidad	Método Likelihood ratio
Fallas, litología, pendiente, geomorfológico, tpi, uso del suelo	Suscep._F	0,77
Fallas, litología, geomorfológico, tpi, uso de suelo	Suscep._4_u	0,76
Fallas, litología, geomorfológico, tpi, uso del suelo, drenaje	Suscep._4_ud	0,76
Curvatura pro, curvatura pla, curv, fallas, litología, pendientes, geomorfológico, tpi	Suscep._8	0,76
Curvatura pla, curv, fallas, litología, pendientes, geomorfológico, tpi	Suscep._7	0,76
Curv, fallas, litología, pendientes, geomorfológico, tpi	Suscep._6	0,76
Fallas, litología, pendientes, geomorfológico, tpi	Suscep._5	0,76
Fallas, litologías, geomorfológico, tpi	Suscep._4	0,75
Todos los factores	Suscep._total	0,74
Litología, geomorfológico	Suscep._2	0,71

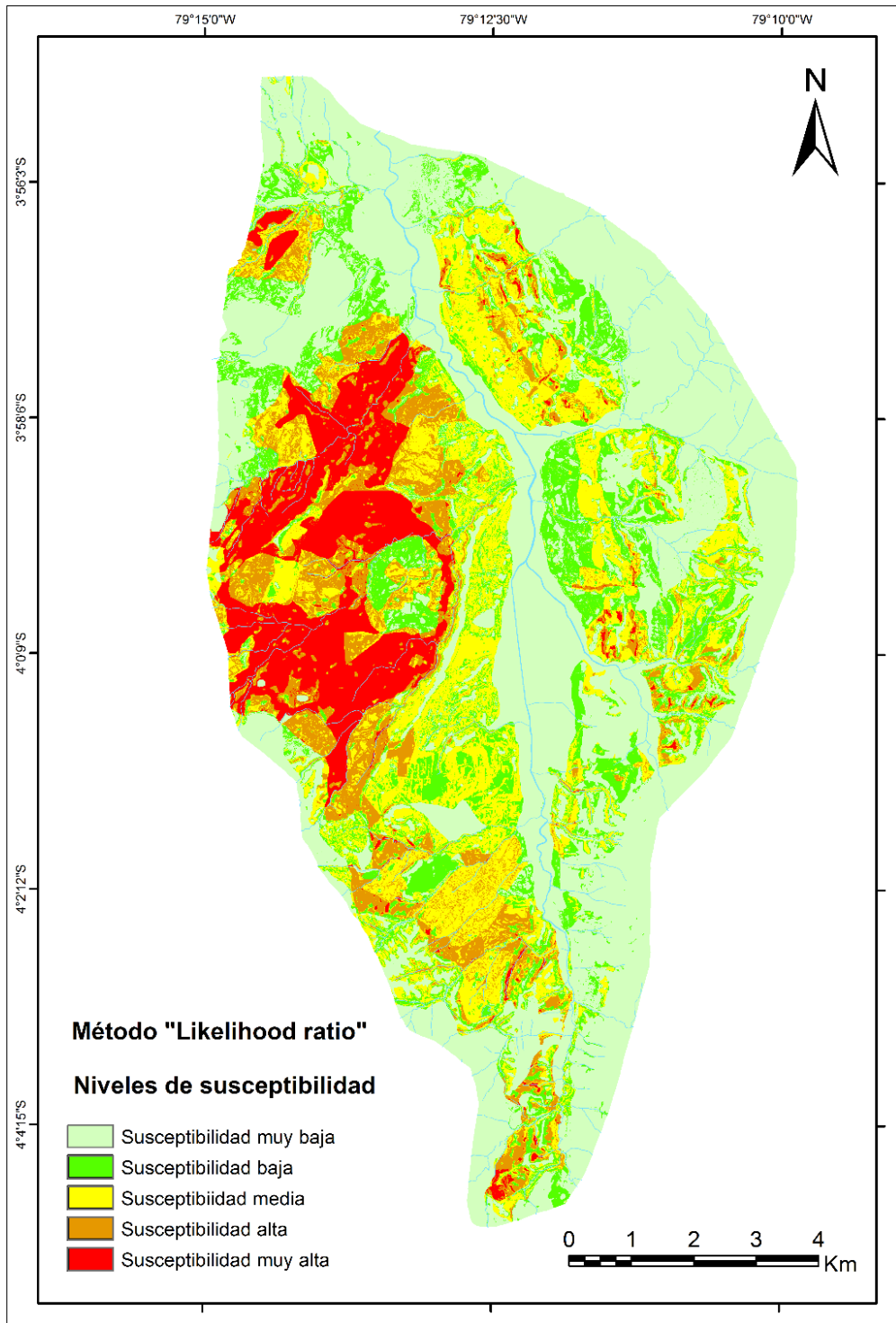


Figura 105. Mapa de susceptibilidad (Likelihood ratio)

Aplicando los mismos factores condicionantes seleccionados para el método Likelihood ratio se generaron igualmente 10 modelos de susceptibilidad con el método de la Matriz, tomando las mismas combinaciones de factores. El mejor modelo de susceptibilidad (figura 106), que resulta de la misma combinación de seis factores condicionantes (**Fallas, Litología, pendiente, geomorfología, tpi, uso del suelo**) y ofrece también el mismo coeficiente de validación (0,77; Tabla 14).

Tabla 14. Coeficientes de validación de los 10 modelos de susceptibilidad generados con el método de la matriz.

VARIABLES UTILIZADAS (FACTORES CONDICIONANTES)	NOMBRE DEL MODELO DE SUSCEPTIBILIDAD	MÉTODO DE LA MATRIZ
Fallas, litología, pendiente, geomorfológico, tpi, uso del suelo	Suscep._F	0,77
Fallas, litología, geomorfológico, tpi, uso de suelo	Suscep._4_u	0,76
Curvatura pro, curvatura pla, curv, fallas, litología, pendientes, geomorfológico, tpi	Suscep._8	0,75
Curvatura pla, curv, fallas, litología, pendientes geomorfológico, tpi	Suscep._7	0,75
Curv, fallas, litología, pendientes, geomorfológico, tpi	Suscep._6	0,75
Fallas, litología, pendientes, geomorfológico, tpi	Suscep._5	0,75
Fallas, litología, geomorfológico, tpi	Suscep._4	0,75
Fallas, litología, geomorfológico, tpi, uso del suelo, drenaje	Suscep._4_ud	0,74
Todas las variables	Suscep._total	0,71
Litología, geomorfológico	Suscep._2	0,67

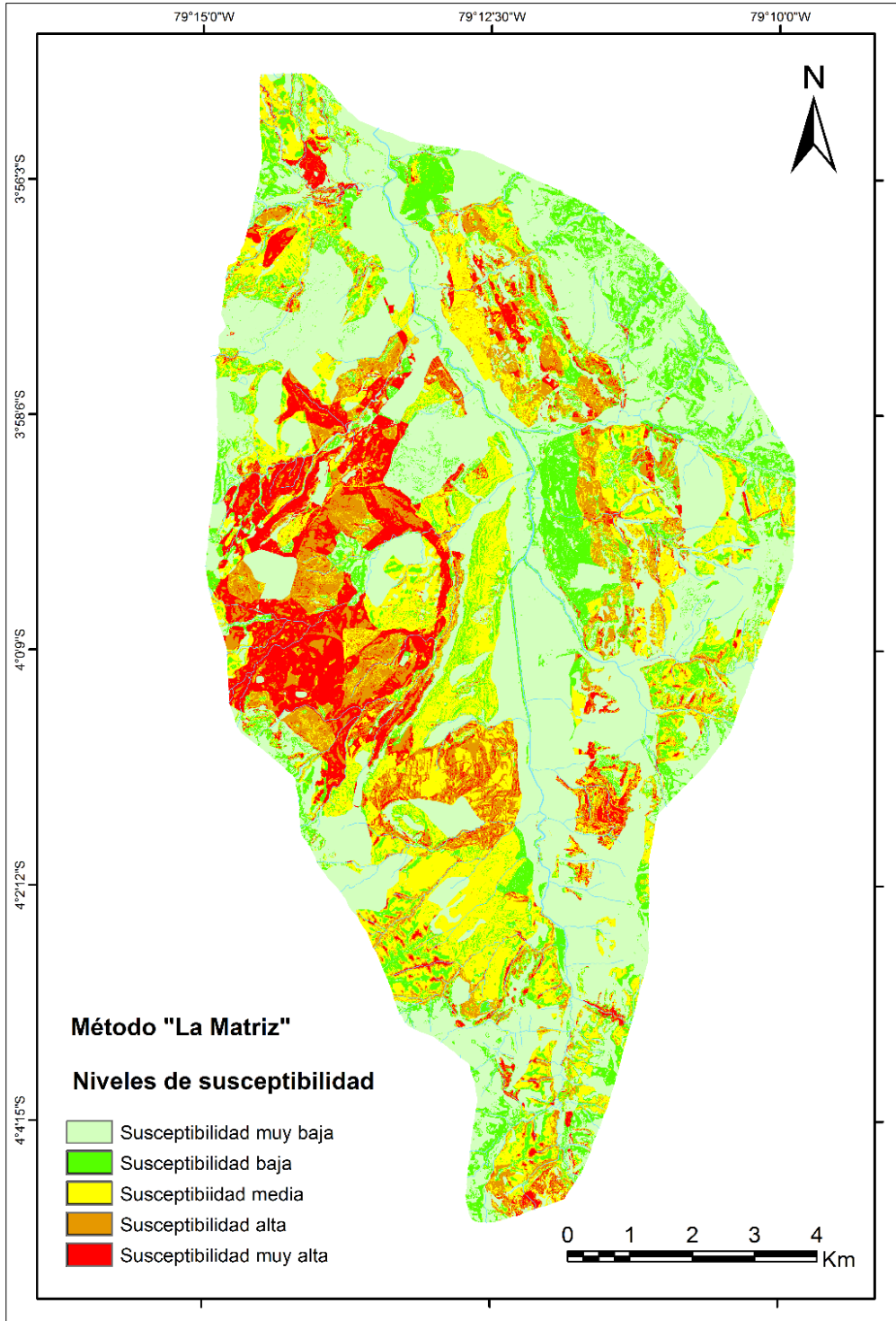


Figura 106. Mapa de susceptibilidad (Método de la matriz)

Es importante destacar que analizando las curvas de predicción (AUPRC) de cada uno de los métodos (Figura 107), tenemos que el método de la “Matriz” reconoce mejor las zonas de mayor susceptibilidad, pero define una zona amplia como baja susceptibilidad, donde todavía se forman deslizamientos; mientras que el “Likelihood ratio” no da tan buenos resultados en la zona de alta susceptibilidad, pero discrimina bien una zona segura y la zona de baja susceptibilidad.

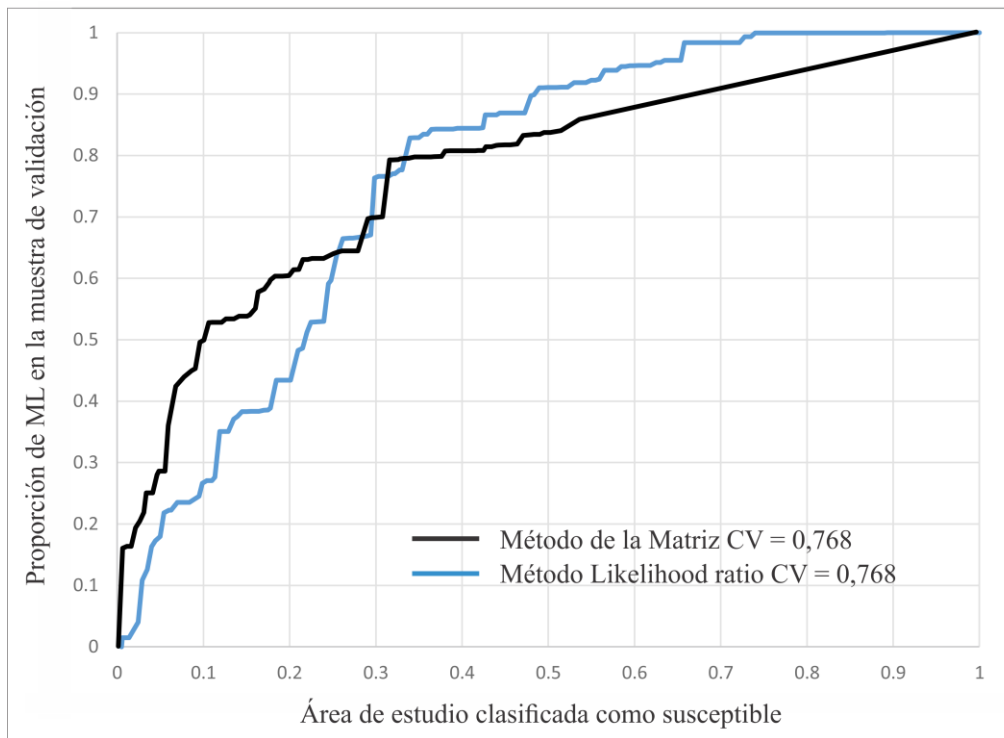


Figura 107. Comparación de las curvas de validación obtenidas para un mismo modelo de susceptibilidad con la aplicación de los dos métodos utilizados en este estudio.

Los mapas obtenidos con la aplicación de las dos metodologías (matriz y LR) se han clasificado en clases de área muy similar para poder comparar bien los modelos. En la tabla 15 se presentan la distribución areal y porcentajes de las clases de susceptibilidad. Como se puede observar las clases son

prácticamente iguales. Los grados de ajuste calculados garantizan la fiabilidad de los métodos (Figura 108).

Tabla 15. Resultado del análisis areal de la susceptibilidad

Método	Nivel de susceptibilidad									
	Muy baja		Baja		Media		Alta		Muy alta	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Matriz	4881.1	45,1	1600.8	15,0	2178.9	20,2	1056.7	9,7	1074.5	9,9
LR	4866.1	45,2	1620.1	14,8	2185.2	20,2	1048.1	9,8	1072.6	10

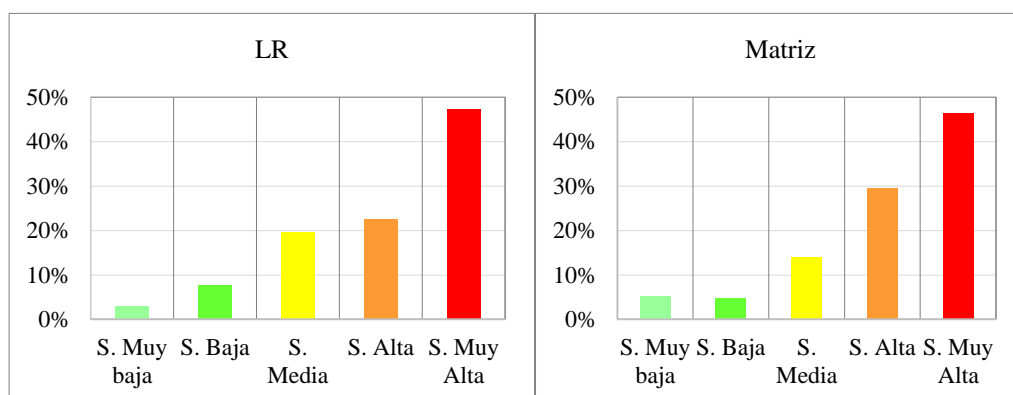


Figura 108. Representación del grado de ajuste por ambos métodos

Conociendo que en todo análisis de susceptibilidad a los movimientos de ladera y los factores condicionantes involucrados en la inestabilidad de las laderas, difieren para cada tipo de movimiento de ladera. Es importante indicar que en este estudio el análisis se lo realizó como un todo aplicado a tipologías de flujo, debido a que el inventario general nos muestra un gran porcentaje de movimientos de ladera relacionados con la tipología de reptación y flujos (95%), y que generalmente son los procesos de reptación que luego evolucionan a flujos de tipo compuesto.

Otro análisis importante es la combinación de la susceptibilidad realizada de ambos métodos (Likelihood ratio y la Matriz), cuyo resultado de la curva de validación (Figura 109) nos muestra que la capacidad de predicción mejora sustancialmente con un valor de 0,8.

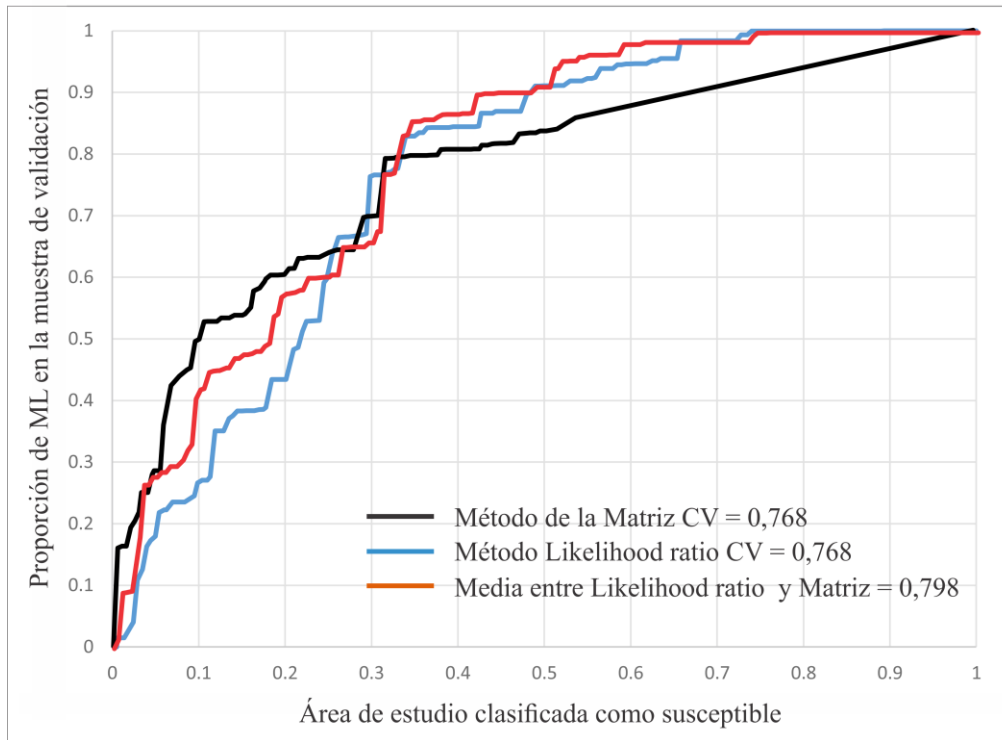


Figura 109. Representación de la curva de validación de cada uno de los métodos aplicados y adicionalmente la curva de validación como resultado de la media entre ambos métodos.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE FACTORES DESENCADENANTES

Como se ha explicado anteriormente, un movimiento de ladera es el resultado de la interacción de dos tipos de factores: **factores condicionantes** (ángulo de pendiente, la resistencia del material, la cubierta vegetal, litología, etc.) que sitúan a las laderas en situaciones de un rango de estable a marginalmente inestable y de los **factores desencadenantes** (lluvias, terremotos, fusión de nieve, etc.) que son los responsables del inicio del evento. Los factores condicionantes evolucionan muy lentamente pudiendo a largo plazo conducir a la inestabilidad de las laderas; mientras que, los factores desencadenantes cambian el estado de las laderas en lapsos de tiempo muy corto, actuando con diferentes niveles de intensidad (Corominas y Moya 2008).

Los factores desencadenantes son aquellos que inician el movimiento de ladera en un momento determinado, debido a la modificación, frecuentemente rápida, de las condiciones preexistentes de estabilidad. Entre estos destacan la **precipitación** (intensa o acumulada), que implica el aumento del contenido de agua y la presión intersticial del suelo; la **actividad sísmica**, que produce aumento del esfuerzo de cizalla; y, la **actividad antrópica** que causa cambios de geometría y pendiente debido a los cortes realizados en el terreno para vías de transporte, túneles, cimentaciones, minería, construcción de edificios, colocación de terraplenes, escombreras o rellenos (cargas ajenas al terreno que modifican sus condiciones: aumento fuerzas desestabilizadoras) y los cambios de las condiciones hidrogeológicas provocados por efecto de actividades como regadío en áreas cultivables especialmente, etc. (Terzaghi 1950; Brunsden 1979; Irigaray 1995; Fernández 2001).

5.1 SISMICIDAD

Como hemos dicho anteriormente otro de los factores desencadenantes para que se generen los movimientos de ladera es la actividad sísmica. Al respecto es importante indicar la situación de Ecuador, respecto al cinturón de fuego del

pacífico, caracterizado por su gran actividad sísmica que causa el proceso de subducción a lo largo del cinturón del pacífico. Específicamente, Ecuador se encuentra afectado por el proceso de subducción de la Placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana (Figura 110), encontrándose expuesto a eventos sísmicos que traen como consecuencia grandes catástrofes. La catástrofe más reciente ocurrió en abril del 2016 en Pedernales con 663 muertos, 6.274 heridos, 28.775 personas albergadas y 6.998 edificios destruidos (*INFORME DE SITUACION N°71–19/05/2016 SNGR*).



Figura 110. Ubicación de la zona de estudio respecto al Ecuador y a las placas tectónicas.

La figura 111, muestra la importante actividad sísmica que ocurre en el sur de Ecuador, lugar donde se ubica nuestra zona de estudio. Sin embargo de ello en esta zona de estudio son muy pocos los registros históricos de los terremotos ocurridos en la ciudad de Loja. Debiendo resaltar el sismo de 1749 que habría destruido Loja (Egred 2009). A pesar de ello no se cuenta con información sobre la activación de movimientos de ladera desencadenados por estos eventos. Lo cual imposibilita hacer un análisis de la recurrencia temporal de la sismicidad y la cantidad de movimientos de ladera que se puedan originar en esa temporalidad. Además es importante considerar que los eventos de terremotos

al ocasionarse en periodos de tiempo muy largo en un mismo sector, imposibilita este análisis para los movimientos de ladera que son recurrentes en periodos de tiempo más cortos.

Hipóticamente la sismicidad se puede considerar otro factor desencadenante en la zona, pero no existen datos suficientes para establecer una correlación fiable entre ambos fenómenos. Por ende nuestro análisis de peligrosidad va a dar resultados mínimos, dado que no se tiene en cuenta ese factor desencadenante. Por el contrario, la existencia de datos históricos si ha permitido realizar análisis acerca de la relación entre movimientos de ladera y la lluvia.

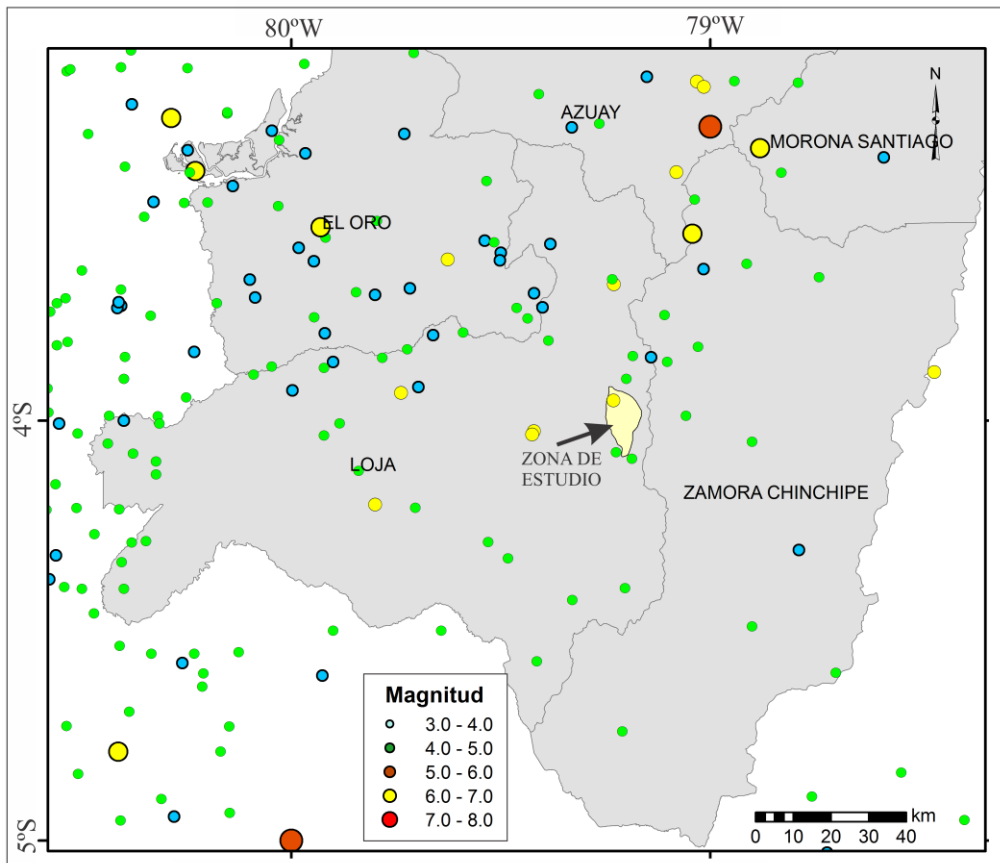


Figura 111. Ubicación de los sismos ocurridos en la región sur del Ecuador, desde 1900 al 2016. La magnitud es dada según la escala de Richter (Fuente: Instituto de Geofísica de la Escuela Politécnica Nacional).

5.2 PRECIPITACIÓN

5.2.1 Introducción

Los movimientos de ladera ocurren frecuentemente como consecuencia de lluvias intensas (Varnes 1984). Estos procesos geomorfológicos generan situaciones de riesgo e incluso catástrofes de similar magnitud que los derivados de otros fenómenos naturales. El potencial destructivo de este fenómeno aumenta con el desarrollo urbanístico en áreas proclives a movimientos de ladera (Aleotti and Chowdhury 1999; Guzzetti et al. 1999). Así, el daño debido a los movimientos de ladera en términos de pérdidas humanas y monetarias está creciendo como causa del crecimiento urbano observado en ciudades localizadas en áreas montañosas. Los movimientos de ladera constituyen una de las mayores amenazas naturales a la que se enfrenta la comunidad andina (Hermans 2012). En la Tabla 16 puede observarse que los movimientos de ladera inducidos por la lluvia causaron pérdidas de millones de dólares y miles de muertes en los Andes.

Como se mencionó anteriormente, los movimientos de ladera constituyen el riesgo natural con un impacto más extendido en Ecuador. Siendo las provincias de Guayas y Loja las que presentan mayor cantidad de eventos (período 2010–2012). Estos eventos se asocian a fenómenos hidrometeorológicos. Y según Eras (2014), en Ecuador tuvieron lugar 3113 movimientos de ladera entre 1970 y 2013. Estos ocurrieron principalmente durante los meses más húmedos: enero, febrero, marzo y abril.

Actualmente, los países desarrollados y los que se encuentran en desarrollo tienen problemas para cubrir los costos de estos daños o para afrontar los gastos de medidas de estabilización de laderas. Esta situación global ha conducido a una estrategia en la que la prevención apoyada por modelos de riesgo, los sistemas de alerta temprana o la planificación del uso del suelo constituye la

forma más adecuada para minimizar las pérdidas humanas y económicas debidas a movimientos de ladera (Aleotti and Chowdhury 1999; Chacón et al. 2006). Esto implica la estimación de la probabilidad de ocurrencia de los movimientos de ladera dentro de un área o periodo de tiempo determinados para la planificación. Para tal fin, se deben recopilar datos sobre la ubicación y la frecuencia de los movimientos de ladera o de sus factores desencadenantes (es decir, lluvia). Por lo tanto, muchos programas o proyectos dirigidos a la reducción de las pérdidas debidas a movimientos de ladera se dedican a recopilar inventarios temporales de movimientos y a integrarlos con análisis de series temporales de datos de precipitación (Casale et al. 1994; Dikau et al. 1996; Panizza 1996; Van Den Eeckhaut and Hervás 2012). La finalidad de esta integración es la estimación de los llamados Critical Rainfall Threshold (CRT), la cantidad y/ o intensidad de las lluvias que desencadenaron los movimientos de ladera en un área específica (Lumb 1975; Crozier and Eyles 1980; Crozier 1986; Kim et al. 1991; Terlien 1996; Terlien 1998; Glade et al. 2000; Wieczorek and Glade 2005; Guzzetti et al. 2007; Guzzetti et al. 2008; Palenzuela et al. 2016).

Hay dos procedimientos principales para estimar CRTs: (1) aplicando modelos físicos regidos por parámetros hidrogeológicos y geotécnicos (Borga et al. 2002; Aleotti et Polloni. 2003; Frattini et al. 2004; Li et al. 2011; De vita et al. 2013; Papa et al. 2013; Ma et al. 2014); o (2) analizando mediante estadística los registros históricos de precipitación y los movimientos de ladera (es decir, métodos empíricos) (Lumb 1975; Crozier and Eyles 1980; Crozier 1986; Kim et al. 1991; Terlien 1996; Terlien 1998; Glade et al. 2000; Wieczorek and Glade 2005; Guzzetti et al. 2007; Guzzetti et al. 2008; Palenzuela et al. 2016). La primera alternativa suele ser costosa, impidiendo su amplia aplicación. La segunda opción necesita una compilación exhaustiva de información histórica y un buen registro de precipitaciones, pero puede ser más asequible que el modelado físico. Además, los resultados de los métodos empíricos pueden

aplicarse a escala regional. Esta característica hace que el análisis de series temporales de los datos de precipitación sea una herramienta útil para estimar la ocurrencia de deslizamientos en el entorno andino.

Tabla 16. *Casos de movimientos de ladera inducidos por lluvias con gran cantidad de daños económicos y muertes*

Localidad	País	Año	Tipología	Muertos	Daños, millones (\$)	Referencias
Vargas	Venezuela	1999	Flujo de derrubios	15000	4000	PNUD 2000; Larsen et al., 2006; Larsen 2008; Salcedo 2007
Villatina	Colombia	1987	Flujo de tierra	450	n/d	
Cerro Pucaloma (La Paz)	Bolivia	2003	Traslational	69	n/d	PMA 2007
Mayunmarca	Perú	1974	Traslacional/flujo	600	n/d	PMA 2007
Antofagasta		1991				
Santiago	Chile	1993	Flujo de derrubios	130	71	Sepúlveda, 2006
Ranco Lake		2004				
Chunchi	Ecuador	1983	n/d	150	n/d	Petley 2005
La Josefina	Ecuador	1993	Flujo	35	147	Petley 2005; Cadier et al. 1996; Zevallos et al. 1996

En la región andina, los movimientos de ladera se han estudiado desde el punto de vista geotécnico (Wilcke et al. 2003; Bussman et al. 2008) y medioambiental (Lozano et al. 2005; Muenchow et al. 2012). Además, se han aplicado análisis estadísticos avanzados para obtener la susceptibilidad en dicha zona (Brenning et al. 2015). Sin embargo, las publicaciones sobre estimaciones de CRTs en los Andes son escasas (Terlien 1996; Terlien1997; Terlien1998; González and Mayorga 2004; Aristizábal et al. 2015), aunque esta información es esencial

para llevar a cabo evaluaciones profundas de peligrosidad y riesgo por movimientos de ladera.

En este apartado se trata de estimar la frecuencia con la que los movimientos de ladera se desarrollan en la cuenca de Loja. El cálculo se basa en una recopilación extensa de datos asociados a 153 movimientos de ladera ocurridos en los últimos 10 años. Por consiguiente, la información derivada ayudará a realizar evaluaciones fiables sobre la peligrosidad de los movimientos de ladera.

5.2.2 Materiales y métodos

El método empírico aplicado en esta investigación consiste en buscar los parámetros de lluvia (duración, precipitación acumulada, intensidad) y su período de retorno asociado con cada evento de movimiento de ladera registrado. Por lo tanto, esta recolección de datos de lluvia permitirá la construcción de CTRs como una curva que correlaciona los parámetros de precipitación que causan movimientos de ladera. Además, el período de retorno de los principales eventos de lluvia que causaron movimientos de ladera se compararon con la oscilación de los ciclos climáticos. El método para extraer los parámetros de lluvia está detallado en Palenzuela et al. (2016). Este método se resume en tres etapas: (1) generación automática de un gran número de series temporales sobre la precipitación acumulada, calculada mediante el cambio de la duración del evento de precipitación; (2) la asignación de frecuencia relativa y su valor de periodo de retorno correspondiente a cada valor de precipitación acumulada según el análisis de la Series de Duración Parcial (Cunnane 1973), y (3) la búsqueda y representación gráfica de los períodos de retorno infrecuentes relacionados con lluvias próximas o contemporáneas a las fechas de los movimientos de ladera datados. Por lo tanto, este método permite la correlación temporal entre los movimientos de ladera del pasado y los parámetros de precipitación, suponiendo que nuevos movimientos de ladera pueden ocurrir en las mismas condiciones geomorfológicas y meteorológicas en el futuro.

Para aplicar este método se necesitaron dos conjuntos de datos: un inventario temporal de movimientos de ladera y una serie de precipitación diaria. De manera que, este último conjunto de información representa el factor desencadenante de los movimientos de ladera catalogados, que puede ser analizado de manera retrospectiva.

a) Catálogo de fechas y localización de los movimientos de ladera y análisis series de precipitación

El catálogo de fechas y localizaciones de movimientos de ladera utilizado para el análisis de las series de precipitación es diferente al generado en el capítulo III. Este se basa específicamente en la recopilación de información de eventos ocurridos en la ciudad de Loja entre 2006 y 2015. Sin embargo, la falta de fuentes de información y datos limita la precisión e integridad de esta base de datos histórica (Ibsen y Brunsden 1996; Palenzuela et al. 2016). Por ejemplo, aunque los periódicos se publican durante largos períodos, los registros de movimientos de ladera comienzan a ser más continuos y detallados de las últimas décadas (Corominas y Moya 2008). También hay información disponible sobre los eventos de movimientos de ladera en instituciones oficiales, pero los procesos burocráticos retrasan el acceso a informes no publicados. Cuando se hace referencia a los inventarios de movimientos de ladera, la falta de datos suele estar relacionada con la baja resolución de las fotografías aéreas o las imágenes de satélite, pero también con la subjetividad y la experiencia laboral del cartógrafo.

Estos son posibles factores que explican el aumento en el número de movimientos de ladera desde 2011 encontrados para el área de estudio. Esto afecta la tendencia global de los umbrales de precipitaciones que desencadenan movimientos de ladera. Específicamente, Gariano et al. (2015) encontraron que incluso una subestimación pequeña (1%) en el número de movimientos de ladera registrados puede dar como resultado un error significativo en la

efectividad de un modelo de predicción basado en el umbral. Como resultado, los movimientos de ladera que ocurren cuando se alcanzan umbrales de lluvia más bajos pueden ser omitidos, generando errores asociados a falsos negativos (una alerta no indicada cuando realmente existe un riesgo de movimientos de ladera). Por el contrario, la distancia geográfica entre las estaciones de medición de precipitaciones y los movimientos de ladera puede dar lugar a una subestimación de los umbrales de activación de movimientos de ladera (Nikolopoulos et al. 2014). Esto podría dar lugar a falsos positivos (alertas para cantidades de lluvia por debajo de un límite crítico).

Concretamente, el conjunto de datos usado en esta investigación fue elaborado a través de la revisión de ficheros de la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos del Ecuador (SNGR-Zona 7) y noticias en la prensa escrita y digital, principalmente en los periódicos "La Hora" y "El Comercio". La búsqueda en los archivos de los periódicos proporcionó información sobre 46 movimientos de ladera que causaron extensos daños en infraestructuras y edificios entre 2006 y 2013.

Los informes del SNGR documentaron 240 movimientos de ladera en la provincia de Loja durante el período comprendido entre 2010 y 2015, de los cuales 167 (70%) ocurrieron en el área de estudio y 153 de ellos disponen de información referente a la fecha y ubicación. El análisis de daños de estos indican que: 1913 personas fueron afectadas directa o indirectamente por estos movimientos de ladera; 259 viviendas fueron dañadas, lo que representa aproximadamente 4 millones de dólares de pérdidas. Lo que es aún más grave aquí es que 7 personas perdieron la vida debido a los movimientos de ladera en la ciudad de Loja entre 2010 y 2015 (Tabla 17). El 90,4% de los movimientos de ladera reportados fueron provocados por eventos de lluvia (Figura 112).

Tabla 17. Daños reportados por movimientos de ladera en la Cuenca de Loja, entre los años 2010-2015(SNGR – Zona 7)

Tipos de daños	Cantidad	Costos aproximados (\$)	Número de deslizamientos
Personas afectadas	1913		global
Muertos	7	incuantificable	2
Casas destruidas	40	2'000.000	11
Casas parcialmente afectadas	219	1'095.000	105
Afectación de carreteras	620 metros		33
Afectación de tuberías de agua	no reportados		8
Afectaciones no reportadas			8
Total			167

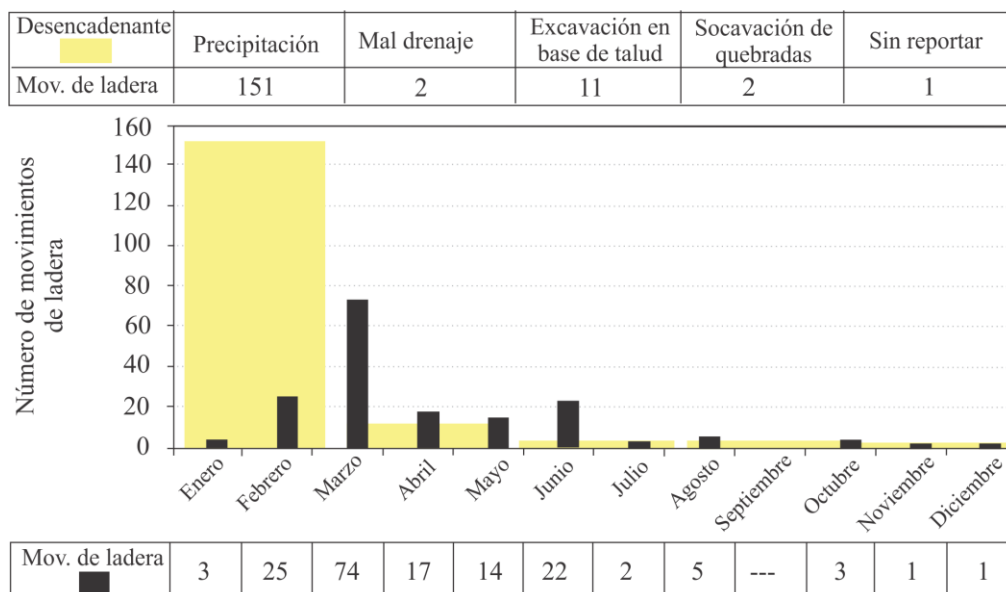


Figura 112. Principales desencadenantes de los movimientos de ladera y distribución mensual, comprendidos entre los años 2010 a 2015 (Fuente SNGR_Zona 7).

La serie de precipitación diaria de la estación meteorológica "La Argelia", que cuenta con el registro de precipitación más amplio y completo de la zona de estudio, es la que se usó en esta investigación. Esta estación está ubicada en el sur del Valle de Loja a 2.160 msnm. La información recogida en esta estación

abarca un período de 52 años comprendido entre el 1 de enero de 1964 y el 30 de septiembre de 2015.

5.2.3 Análisis de series temporales pluviométricas

Es importante señalar que para la realización de este análisis se contó con la colaboración de José Antonio Palenzuela del departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Granada. Para llevar a cabo el análisis estadístico de series de precipitación, en primer lugar se calcularon los siguientes parámetros: duración del evento de lluvia, precipitación acumulada e intensidad. Teniendo en cuenta una amplia gama de duraciones de eventos de lluvia (1-90 días) se generó un nuevo conjunto de series temporales. Una vez completadas estas nuevas series se realiza el análisis de frecuencia basado en Series de Duración Parcial (PDS) en lugar de obtener la frecuencia acumulativa observada ($CF(X \leq x)$) exclusivamente en los picos mensuales o anuales. Esto último sería más adecuado para el análisis de inundaciones o distribución de temperaturas máximas, donde se usan las Series de Máximos Anuales (AMS) o las Series de Flujos Anuales (MAF). A diferencia de estos tipos de series, las PDS permiten el análisis de eventos pluviométricos de diferentes duraciones, ya que no están restringidos a las lluvias diarias (es decir, lluvia de 1 día de duración) o a duraciones más largas (por ejemplo, lluvias mensuales o anuales). Este método implica la evaluación de las múltiples combinaciones duración-lluvia acumulada obteniendo sus frecuencias acumuladas y períodos de retorno ($T = 1/CF$).

En este estudio se generaron 90 PDSs para duraciones de 1 a 90 días. Los cálculos repetitivos para cada fecha de las 90 series requirieron su automatización utilizando macros VBA (Palenzuela et al. 2016). Además, una vez calculados de forma automática, los valores de las variables pluviométricas correspondientes a cada uno de los 93 eventos pluviométricos asociados a los 153 movimientos de ladera se extrajeron de cada una de las PDSs mediante otro

script creado para la búsqueda de eventos pluviométricos asociados a las fechas de los movimientos de ladera catalogados. Los valores encontrados se representaron gráficamente y se analizaron las relaciones entre las variables de precipitación y entre éstas y el período de retorno. Este análisis tiene como objetivo caracterizar los eventos que desencadenaron los movimientos de ladera catalogados, poniendo de manifiesto los umbrales pluviométricos que se alcanzaron o sobrepasaron, así como los intervalos temporales dentro de los cuales se espera que dichos eventos pluviométricos se vuelvan a repetir en el área de estudio.

Complementariamente al análisis umbrales de lluvias basado en PDSs, se analizó el registro de precipitaciones con el objetivo de detectar ciclos climáticos naturales que pudieran estar relacionados con la intensificación de los procesos de movimientos de ladera. Para este fin se ha empleado el análisis espectral, ya que es una herramienta estadística para analizar la distribución (sobre la frecuencia) de la potencia contenida en una señal, basado en un conjunto finito de datos (Jenkins and Watts 1968; Pardo-Igúzquiza and Rodríguez-Tovar 2012). El procesamiento de datos meteorológicos basado en esta técnica, busca determinar la existencia y significación estadística de los ciclos climáticos (Knippertz 2003; Karagiannidis et al. 2007; Luque-Espinar et al. 2008). Los cálculos se basan en el enfoque de Blackman–Tukey (Blackman and Tukey 1958), el cual es conocido por ser utilizado para inferir el espectro de potencia porque ofrece buenos resultados ya que los ciclos climáticos están bien identificados y la confianza estadística es mayor (Luque-Espinar et al. 2008; Pardo-Igúzquiza and Rodríguez-Tovar 2012).

5.2.4 Resultados

Mediante la metodología anterior, para cada fecha en la que se registraron uno o más movimientos de ladera se obtuvieron 90 posibles combinaciones de lluvia acumulada e intensidad diaria, teniendo en cuenta duraciones de 1 a 90 días. La

integración de estas 90 combinaciones con 93 fechas de ocurrencia de movimientos de ladera resultó en 8.370 casos de condiciones climáticas diferentes relacionadas con los eventos de movimientos de ladera. Sin embargo, no todas estas posibilidades se asociaron a periodos de retorno con valores atípicos para el área de estudio. En general, a partir de los resultados del PDS, se pudo observar que los períodos de retorno más altos coinciden con las intensidades más altas, independientemente de la duración de la lluvia en días, mientras que se encontraron otras combinaciones que mostraron lluvia acumulada con valores comunes (con tasas de recurrencia cortas a muy cortas). Por lo tanto, las intensidades máximas extraídas de las PDSs se usaron para obtener los CRTs. Como puede observarse en la figura 113, los periodos de retorno mínimo y medio son menores que 1 año. Sin embargo, el 24% de los 22 movimientos de ladera presentan periodos de retorno máximos mayores que el año (Tabla 18).

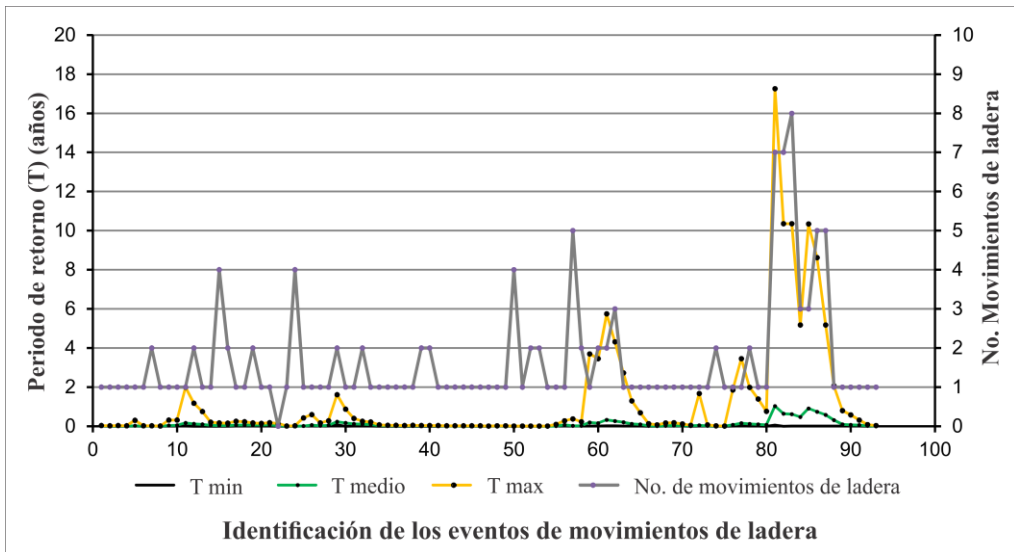


Figura 113. Trazado del periodo de retorno mínimo, promedio y máximo (T_{min} , T_{medio} y T_{max} , respectivamente) para la precipitación acumulada correspondiente a diferentes duraciones para los 93 eventos de lluvia asociados con los movimientos de ladera catalogados (eje vertical izquierdo). Las lecturas en el eje vertical derecho muestran la cantidad de movimientos de ladera registrados para cada caso.

Los casos 12, 28, 60-63 y 81-87 muestran periodos de retorno anómalamente largos que coinciden con aumentos considerables en el número de movimientos de ladera registrados. Sin embargo, en otros casos, con un aumento similar en la ocurrencia de movimientos de ladera, los períodos de retorno son significativamente menores (24, 50, 57).

Tabla 18. Fechas para los 22 eventos de lluvia asociados a movimientos de ladera con mayor periodo de retorno, y agrupación de los eventos en diferentes MORLEs con su periodo de retorno representativo.

Fecha	T máx. (y)	Nº Mov.	T max. promedio (y)
15/02/2011	2	2	1,6
16/02/2011	1,2		
28/02/2012	1,6	---	
04/03/2014	3,7	6	3,6
05/03/2014	3,5		
09/03/2014	5,8		
10/03/2014	4,3		
11/03/2014	2,7		
14/03/2014	1,3		
25/10/2014	1,7	---	
18/03/2015	1,8	9	6,9
20/03/2015	3,5		
22/03/2015	2		
23/03/2015	1,4		
26/03/2015	17,3		
27/03/2015	10,4		
28/03/2015	10,4		
29/03/2015	5,2		
31/03/2015	10,3		
01/04/2015	8,6	3	5,3
02/04/2015	5,2		
06/04/2015	2,1		

En la tabla 18 y la figura 114 se han agrupado los 22 movimientos anteriores en función de su coalescencia (cercanía por mes) temporal como representativos de MORLEs, y a su vez, de diferentes escenarios de peligrosidad para diferentes periodos de retorno. Si bien el número de datos son escasos, la gráfica de la figura 114 muestra una clara tendencia al incremento del número de movimientos con el periodo de retorno.

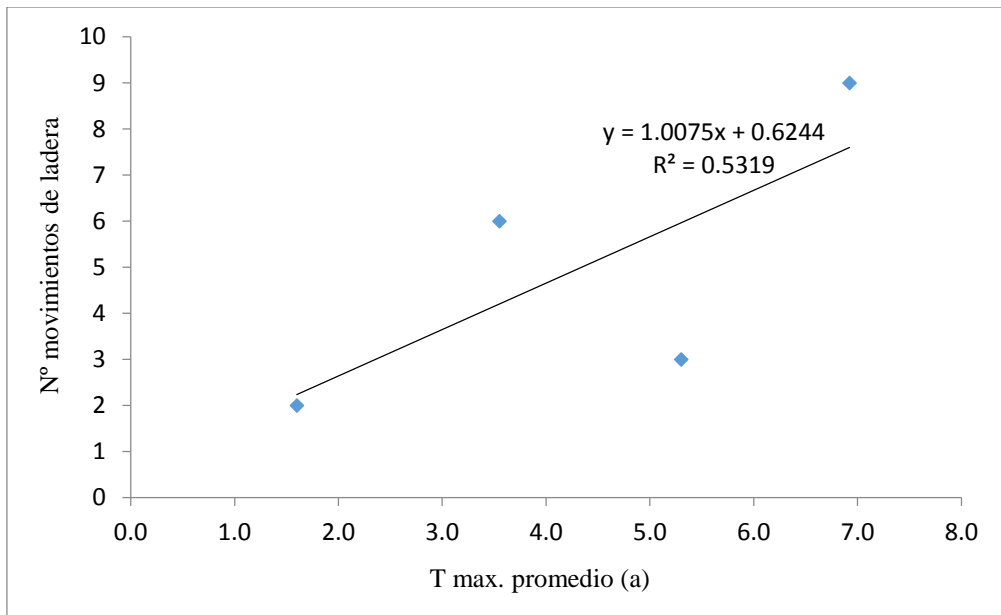


Figura 114. Recta de frecuencia de ML frente a periodos de retorno para MORLEs recientes más importantes.

De acuerdo con la tendencia general manifestada anteriormente en la que períodos de retorno más altos (T max.) se asocian a las máximas intensidades y a un mayor número de movimientos desencadenados, el período de retorno máximo se utilizó como indicador de los umbrales críticos de precipitaciones poco comunes capaces de desencadenar uno o más movimientos de ladera. Partiendo de este criterio, se analizó gráficamente la correlación entre la duración (Figura 115a), la precipitación acumulada (Figura 115b) y la intensidad (Figura 115c) de los eventos pluviométricos con dichos períodos obtenidos. Asimismo, se construyó el gráfico de puntos para las variables T máx., e intensidad (Figura

115d). Para obtener una medida numérica de estas correlaciones se demostró la relación lógica entre la precipitación acumulada y la duración mediante el cálculo del coeficiente de regresión de Pearson ($r = 0,87$ en la Tabla 19): cuanto mayor es la duración de la precipitación, mayor es la cantidad de precipitación acumulada. Además, se encontró la mayor correlación entre el período de retorno máximo y la intensidad de lluvia ($r = 0,36$ en la Tabla 19).

Independientemente de los valores de las variables de duración o precipitación acumulada (evitando valores predefinidos), también se demostró la influencia de la intensidad en el período de retorno máximo. La semejanza entre los patrones de los períodos máximos de retorno y la intensidad máxima se muestra gráficamente en la figura 115c. Sin embargo, según el diagrama de dispersión de la figura 115d no se consideró razonable establecer una correlación matemática confiable entre estas variables.

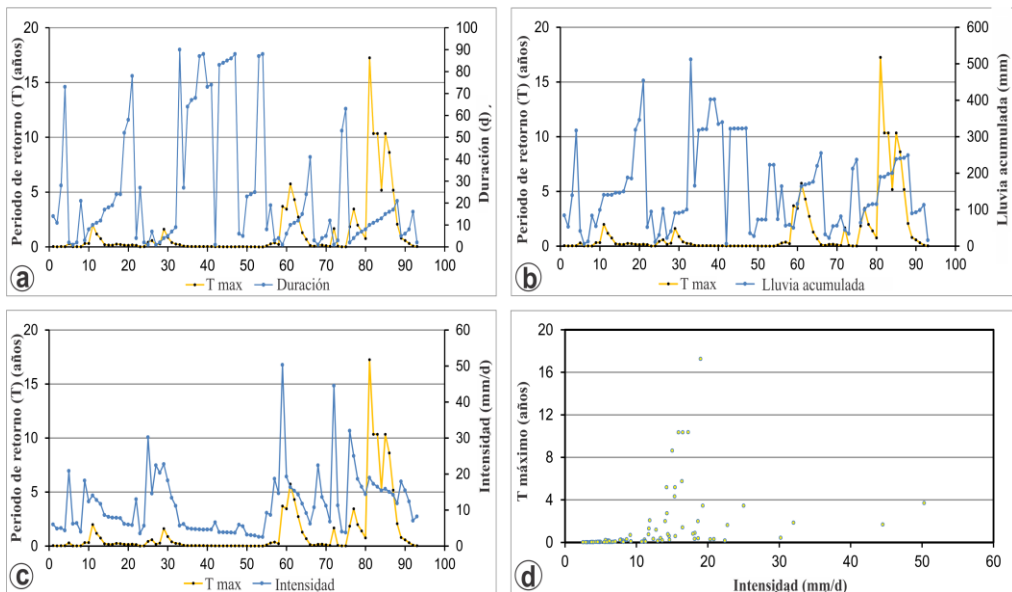


Figure 115. a) Gráficos del periodo de retorno máximo (T_{max}) y duración de los eventos de lluvia vinculados. b) Gráficos T_{max} y la lluvia acumulada para los mismos eventos. c) T_{max} y la intensidad para tales eventos. d) Trazado de T_{max} , frente a su intensidad correspondiente.

Tabla 19. Coeficiente de correlación de Pearson (r) entre variables pluviométricas y periodo de retorno máximo (T máx.).

	T max (y).	Dur. (d)	Lluvia acumulada (mm)	Int. (mm/d)
T max (y).	1,00			
Dur. (d)	-0,22	1,00		
Lluvia acumul.(mm)	0,07	0,87	1,00	
Int. (mm/d)	0,36	-0,56	-0,41	1,00

Después analizar las relaciones entre las variables pluviométricas, se calcularon los CRTs teniendo en cuenta las dos variables que intervienen en el parámetro “intensidad”, es decir, la duración y la precipitación acumulada (Figura 116). La curva de umbral de precipitación superior y la curva de umbral inferior se añadieron a los pares de $I - D$. Además, se dibujó una curva de umbral más conservadora restando un 10 por ciento a los valores de la curva de umbral inferior. Estas curvas se ajustaron a las siguientes funciones potenciales con un alto coeficiente de correlación:

- Límite superior: $A = 51,29D^{0.51}$, $R^2 = 0,98$
- Límite inferior: $A = 7,08D^{0.79}$, $R^2 = 0,98$
- 10% del límite inferior: $A = 6,38D^{0.79}$

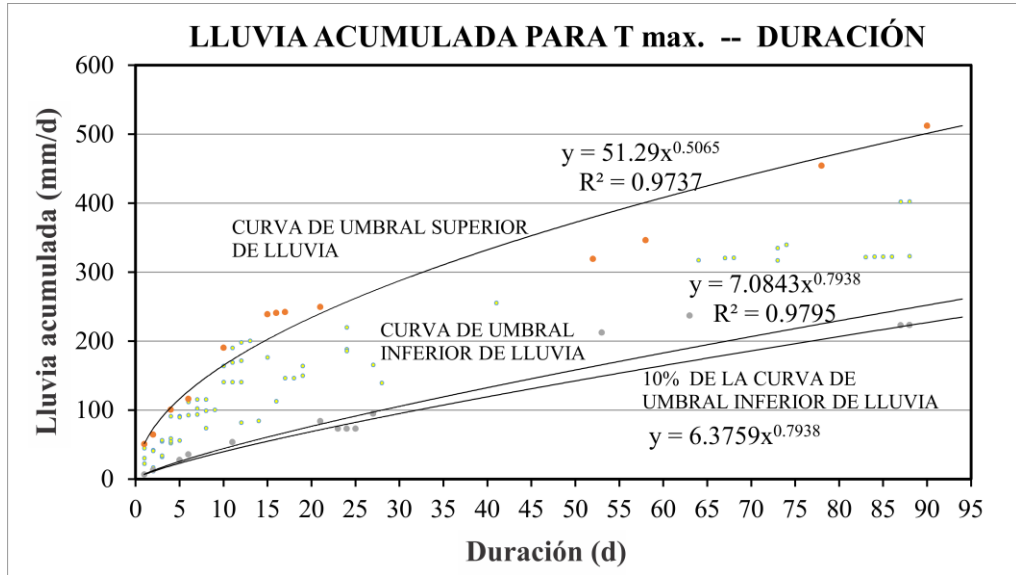


Figura 116. Curvas críticas de umbrales de lluvias

Adicionalmente, dentro del análisis pluviométrico, se han calculado los valores de lluvia acumulada para el periodo anual más húmedo de la zona de estudio. Para ello se ha tenido en cuenta los meses con mayor concentración de lluvia de octubre a abril (Tabla 20), cuando se alcanza casi las 3/4 partes de la lluvia total anual media. Es importante resaltar la tendencia creciente observada en el gráfico de la figura 117 sobre la lluvia total. Más importante aún es la creciente aparición de máximos pluviométricos asociados a periodos de retorno altos (lluvias poco comunes) a partir del año hidrológico 1990-1991. Esto tiene un efecto directo como incremento en la lluvia acumulada durante los meses de octubre a abril con el transcurso de los años hidrológicos (pendiente del 1%). Por otra parte, la pendiente para el periodo de retorno aumenta mucho más despacio: 0,3%, lo que indica que las lluvias que hacen aumentar la tendencia general no son tan inusuales o se dan con significativa frecuencia. Esto se demuestra mejor al dividir el gráfico de la figura 117 en dos partes, tomando como referencia el año hidrológico 1990-91. Mientras que la precipitación sugiere un claro aumento (2,2 %) hasta 1990 en el gráfico de la figura 118, en la siguiente parte de los datos observados (1991-2015) este aumento se desacelera (0,7 %) (Figura

119). Por otro lado, el periodo de retorno que venía aumentando en la primera parte muestreada (Figura 118), incluso se invierte en la segunda parte (Figura 119). Además, durante los 25 años de la primera parte (1964-1990) se recogieron 16.558 mm, en contraste de los 18.014 mm acumulados en los 24 años siguientes (1991-2015). Esto supone un aumento del 13% en la lluvia media anual hasta el segundo intervalo anual. Por otro lado, el descenso en el periodo de retorno de la segunda parte de los datos segmentados sugiere que la recurrencia de picos máximos de lluvia, y en general, de las lluvias para el periodo mensual estudiado, no son tan infrecuentes.

Tabla 20. *Precipitación media mensual entre los años 1964 y 2015*

Mes	Precipitación media (mm)	Intervalo mensual	% Precipitación media anual
Enero	91,77	oct - abr	71,76
Febrero	123,69	may - sep	28,24
Marzo	139,18		
Abril	93,16		
Mayo	61,43		
Junio	61,88		
Julio	53,53		
Agosto	45,25		
Septiembre	42,97		
Octubre	73,66		
Noviembre	66,85		
Diciembre	85,09		
Total anual:	938,47		

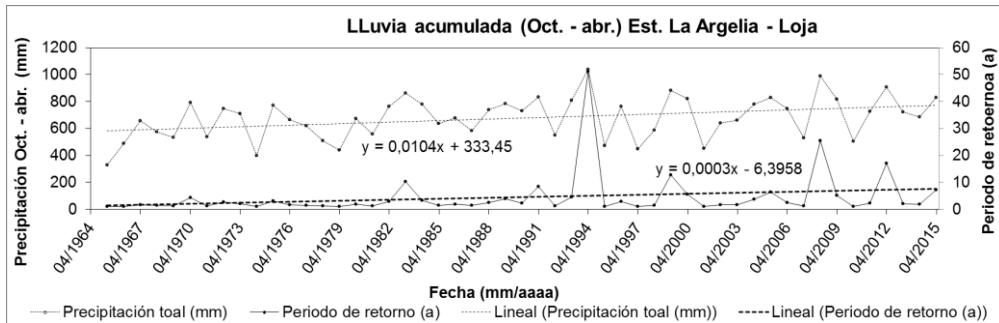


Figura 117. Tendencia creciente sobre la lluvia total acumulada entre los años 1964 a 2015

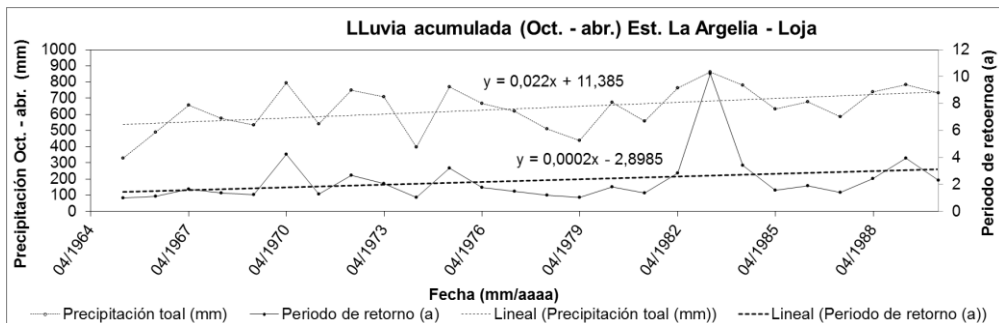


Figura 118. Tendencia creciente sobre la lluvia total acumulada entre los años 1964 a 1990

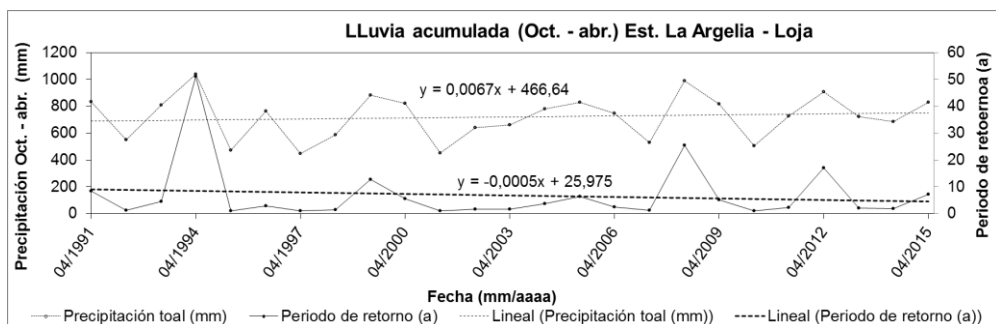


Figura 119. Estabilización de la lluvia total acumulada entre los años 1991 a 2015

Análisis espectral de la serie pluviométrica y su relación con ciclos climáticos.

El análisis espectral es realizado con la colaboración de Juan Antonio Luque del Instituto Geológico Minero de España (IGME-Granada). Este proporciona información sobre la existencia de ciclos climáticos con distintas frecuencias, que pueden estar relacionadas con fenómenos climáticos conocidos. Los ciclos detectados fueron: semi-anual, anual y Quasi-Biennial Oscillation (QBO) por

encima del nivel de confianza del 99%, y El Niño Southern Oscillation (ENSO) ENSO, North Atlantic Oscillation NAO y mancha solar (SUNSPOT) por debajo del nivel de confianza del 90% (Figura 120). Los ciclos asociados con la (QBO), ENSO, NAO y SUNSPOT comprenden 2-2,9; 5-6; 6-10 y 10,5-12 años respectivamente (Labitzke et al. 1990; Lamb 1977; Hurrell 1995; Stuiver and Braziunas 1989). Teniendo en cuenta estos ciclos climáticos, se establecieron algunas correlaciones temporales entre los períodos de retorno máximo y estos fenómenos climáticos. Como se muestra en la tabla 17, tres eventos de lluvia con un período de retorno máximo de 5-6 años coinciden con los ciclos de ENSO, seis eventos con períodos de retorno máximo de aproximadamente 2 años corresponden a ciclos QBO, y tres casos ocurridos en marzo de 2015 muestran un período de retorno máximo de 10,3 años, que probablemente se asocia a ciclos SUNSPOT.

También se puede observar que para el período anual (~ 4 años) indicado en la tabla 17, algunos eventos pluviométricos que aparecen más próximos entre sí a lo esperado de su período de retorno estimado. Este hecho hace difícil interpretar si coinciden con los ciclos climáticos verdaderos o sólo representan eventos de lluvia que se han repetido con mayor frecuencia que la estimada. Por otro lado, los casos de ENSO pueden confundirse con los ciclos armónicos SUNSPOT (Lamb 1977). Sin embargo, está claro que, a pesar de las precipitaciones con menores periodos de retorno que aparecen en ese mes, el período de retorno más alto para las lluvias que terminan en 27-31 de marzo de 2015 corresponde a ciclos SUNSPOT (≈ 10 a). Es importante resaltar que estos eventos corresponden con los eventos de mayor número de movimientos de ladera registrados (> 5 en Figura 120).

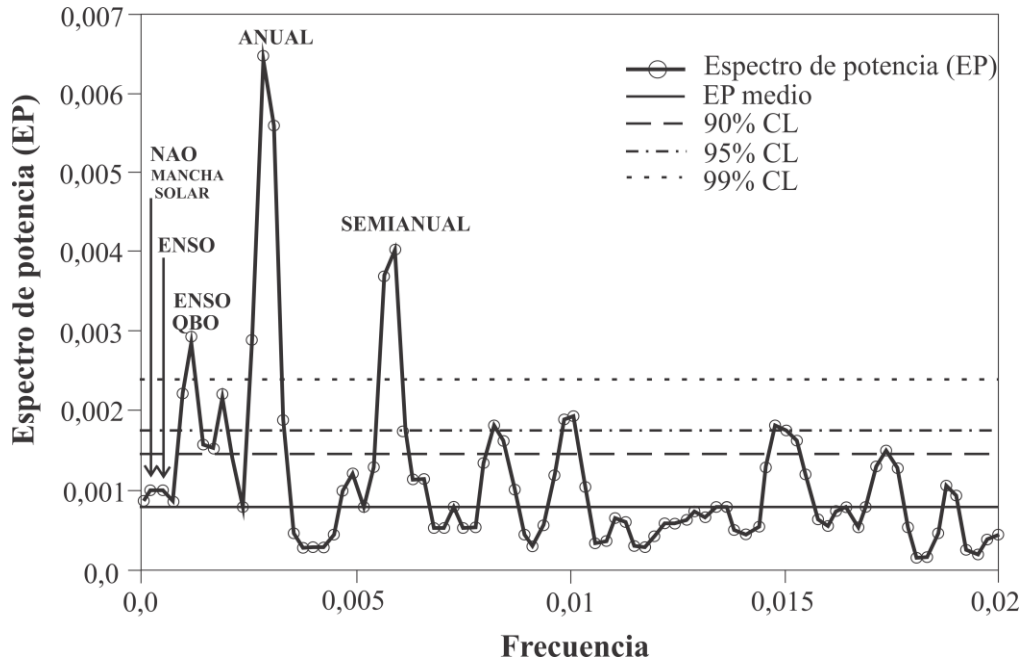


Figura 120. Espectros de potencia del registro histórico de precipitaciones "La Argelia"

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS DE LA PELIGROSIDAD

Para el análisis de la peligrosidad se ha optado por aplicar la multitemporabilidad en base a los inventarios de campo en diferentes periodos de tiempo, desarrollado en el capítulo III. No se ha considerado la utilización de los umbrales críticos de lluvia debido a que ello suponía realizar análisis adicionales que demandan mayor cantidad de información relacionada con el catálogo de datos sobre fechas de ocurrencia de los movimientos de ladera, que es casi imposible obtener. Por el contrario, que el uso del inventario multitemporal generado para este fin se ha podido aplicar de manera directa, considerando que en la zona la recurrencia de los movimientos de ladera es rápida.

La probabilidad de ocurrencia de movimientos de ladera puede ser estimada a partir de la observación de la frecuencia de movimientos de ladera ocurridos en el pasado (Brabb 1984). El análisis de eventos de movimientos de ladera previos puede realizarse directamente usando registros de los movimientos de ladera identificados en el área de estudio o, alternativamente, puede ser realizado indirectamente usando la información relativa a la recurrencia de los eventos de que ocasionan los movimientos de ladera (Corominas y Moya 2008).

Remondo (2001), señala que cuando en un área se dispone de una serie temporal de movimientos de ladera se puede estimar la probabilidad de ocurrencia, lo que puede utilizarse para la elaboración de mapas de peligrosidad, siempre y cuando las condiciones ambientales sean relativamente homogéneas. El problema de los modelos probabilísticos reside en la dificultad de tener una serie de movimientos de ladera datados, a partir de lo cual calcular la probabilidad. Son pocos los trabajos que han abordado este problema con series temporales suficientemente representativas. Entre ellos, caben citar los de Starkel (1966); Grove (1972); Kotarba (1988); Van Steijn (1991); Corominas et al. (1992); Cendrero et al. (1994); González-Díez (1995); González-Díez et al. (1996, 1999); Remondo (2001).

Por tanto, en esta investigación, previo al análisis de la peligrosidad se requiere realizar un análisis de la tasa de recurrencia de movimientos de ladera ocurridos en Loja, que nos permita obtener inventarios multitemporales.

6.1 ANÁLISIS DE LA TASA DE RECURRENCIA DE MOVIMIENTOS DE LADERA OCURRIDOS EN LOJA

Una vez generados los mapas de inventario temporales de los movimientos de ladera conforme se indica en el capítulo III, se realizó un análisis espacio-temporal de la ocurrencia de movimientos de ladera en la cuenca de Loja (Tabla 20) en tres periodos diferentes: **P1** (1999-2003), **P2** (2003-2010), **P3** (2010-2015), obteniendo un valor medio de recurrencia de movimientos de ladera al año en base a los píxeles movidos en cada periodo de inventario (P1, P2, P3).

Tabla 21. Análisis espacio-temporal de movimientos de ladera, inventariados en los 3 periodos considerados.

Periodo	Movimientos de ladera	Píxeles movidos	Área movilizada (m²)	No. de años
P1 (1999-2003)	84	58.813	529.317	4
P2 (2003-2010)	111	128.745	1.158.711	7
P3 (2010-2015)	115	318.114	2.863.028	5
Total	310	505.673	4.551.058	16
			455,10 Ha	

Por tanto, realizando la relación entre los píxeles totales movidos en los tres periodos (16 años), se obtiene que anualmente se mueven 31.604 píxeles, lo que corresponde a 284.441 m² de terreno movido al año. Igualmente, relacionando el total de píxeles movidos en los tres periodos (505.673) con el total de los movimientos de ladera de esos tres periodos (310), se obtiene un valor medio de los píxeles movidos por movimiento de ladera que sería igual a 1.631 píxeles, lo que corresponde a 14.680 m² como promedio de terreno movido por cada movimiento de ladera. Finalmente, la relación de píxeles movidos al año (31.604) con el valor medio de píxeles movidos por movimiento de ladera

(1.631) permite obtener el número aproximado de movimientos de ladera que ocurriría por año, cuyo valor es de unos 19 movimientos de ladera/año, que corresponde con la relación del total de movimientos de ladera obtenidos (310) con el periodo de tiempo del inventario (16 años). La figura 121 muestra el porcentaje de área movilizada en cada periodo de inventario, siendo el periodo 3 (2010-2015) donde se generó mayor cantidad de movimiento del terreno con un 2,7% del área estudiada, lo que representa 286,3 hectáreas del total de las 455,1 hectáreas movidas entre los 3 periodos.

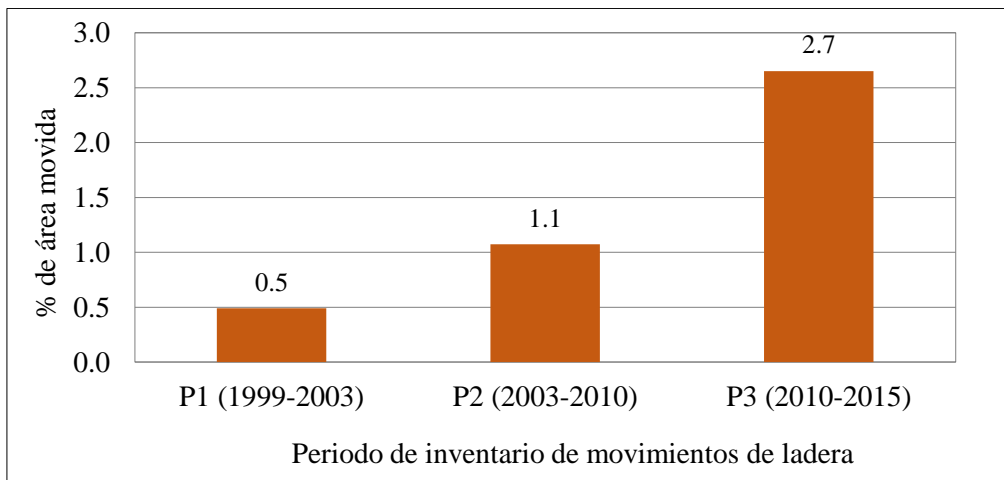


Figure 121. Porcentaje de área movida por periodo de inventario

6.2 METODOLOGÍA UTILIZADA PARA EL ANÁLISIS DE LA PELIGROSIDAD

Los modelos de susceptibilidad expresan la probabilidad relativa del terreno a ser afectado por movimientos de ladera. Estos modelos compartimentan el territorio en porciones con distintos grados de susceptibilidad en términos relativos, pero no aportan información sobre la frecuencia temporal del proceso (cuantos movimientos de ladera cabe esperar que se formen en cada zona durante un intervalo de tiempo; por ejemplo, número de movimientos de ladera por año). Los modelos que constituyen pronósticos sobre la probabilidad

espacio-temporal de nuevos movimientos de ladera se pueden considerar modelos de peligrosidad. La peligrosidad, en sentido estricto, debería incluir información sobre la magnitud del proceso (por ejemplo, dimensión del movimiento de ladera, velocidad de desplazamiento, etc.). No obstante, y puesto que el modelo de probabilidad espacio-temporal desarrollado en este trabajo se ha construido para un determinado tipo de movimiento de ladera (reptación-flujo), dicho modelo formula una predicción para la puesta en movimiento de cada píxel para este tipo de proceso.

El modelo de peligrosidad de movimientos de ladera se ha derivado a partir del modelo de susceptibilidad generado con una media entre el método de la “Matriz” y el método “Likelihood ratio”, cuya combinación ofrecía una mayor capacidad predictiva. Para la transformación del modelo de susceptibilidad en otro de peligrosidad se ha seguido la metodología planteada por otros autores para la generación de modelos de peligrosidad por deslizamientos (Remondo et al. 2005; Bonachea 2006). En primer lugar, se ha ajustado una función monótona no creciente definida por intervalos (Fabbri et al. 2003). Las condiciones que debe cumplir esta función de ajuste (Figura 122) son que se desvíe lo mínimo posible de las frecuencias observadas de nuevos movimientos de ladera en cada clase y que el sumatorio de las proporciones teóricas que a partir de ella se calculen para cada clase sea igual a 1. Posteriormente, utilizando la curva de ajuste (Figura 123) y considerando el número de píxeles movilizados, se calcula un valor de probabilidad espacio-temporal (valor mínimo) para cada unidad, utilizando la siguiente formula:

$$\text{Probabilidad por unidad de área de la clase } i = 1 - \left\{ 1 - \left(\frac{\text{área con ML en la clase } i \text{ para un tiempo } t}{\text{área de la clase } i} \right) \right\}$$

El modelo de susceptibilidad ha sido reclasificado en 5 clases de igual superficie (número de píxeles), siendo la clase 5 la más susceptible y la clase 1 la menos susceptible. En cambio, el modelo de peligrosidad generado presenta valores de

probabilidad dentro del rango comprendido entre 0 y 1. Esta probabilidad se refiere a una ventana temporal y unidad de superficie determinadas.

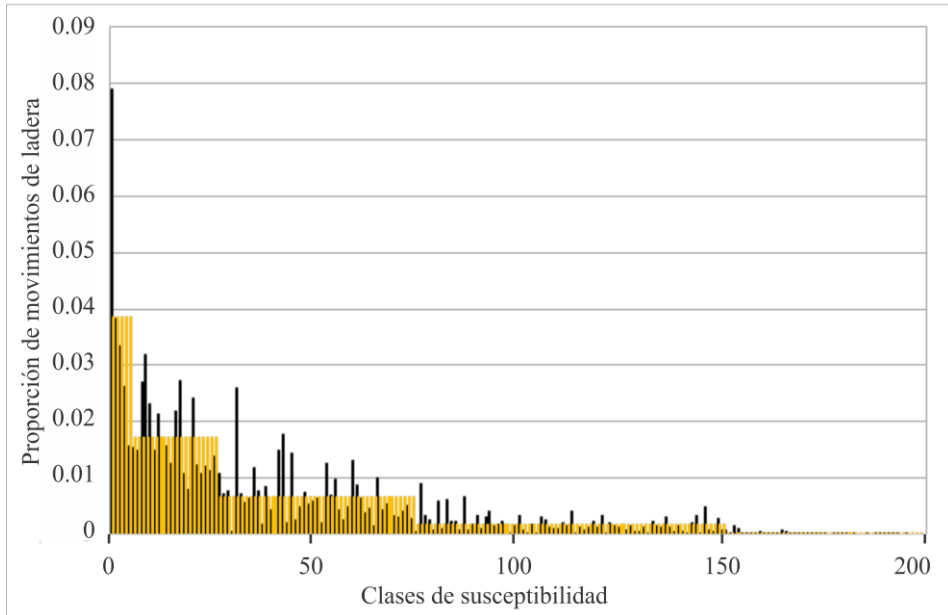


Figura 122. Histograma de frecuencias de los movimientos de ladera ocurridos en cada una de las diferentes clases de susceptibilidad del modelo.

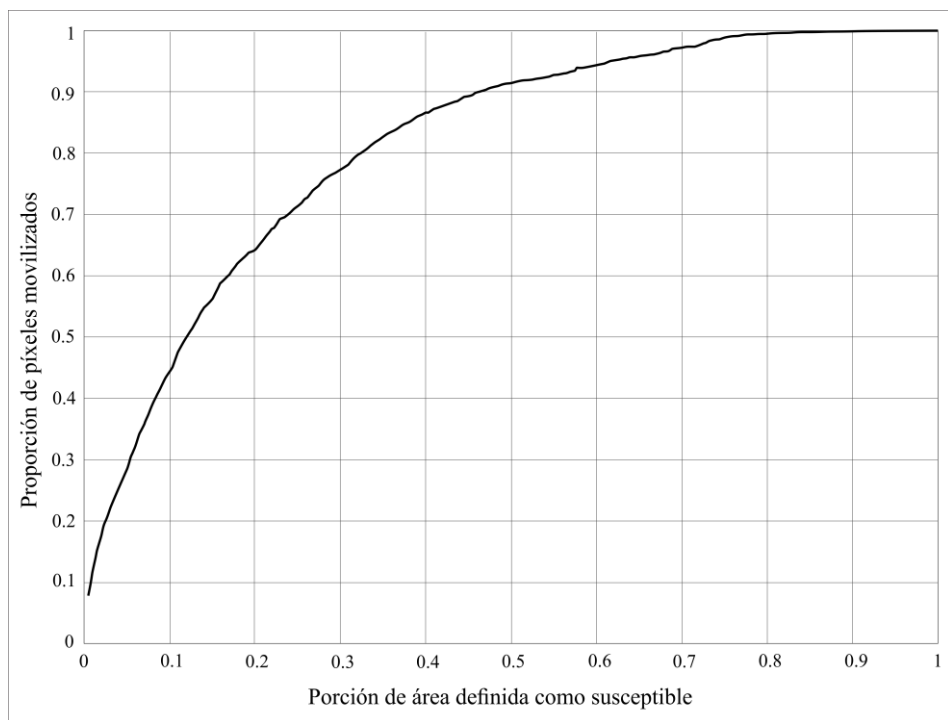


Figura 123. Curva de ajuste del modelo de susceptibilidad

6.3 RESULTADOS DE PELIGROSIDAD

La estimación de la peligrosidad constituye el paso intermedio para la evaluación del riesgo. Los datos temporales sobre la ocurrencia de los movimientos de ladera en varios periodos en la zona de estudio, generados a través de los inventarios de movimientos de ladera han permitido realizar el modelo de peligrosidad que se presenta en la figura 124. El modelo define la probabilidad anual de cada píxel a moverse. Para la mejor visualización del mapa obtenido se ha representado mediante una escala de color tipo semáforo: celeste para los más bajos hasta el rojo para los más altos, pasando por el verde, amarillo y naranja para los valores intermedios.

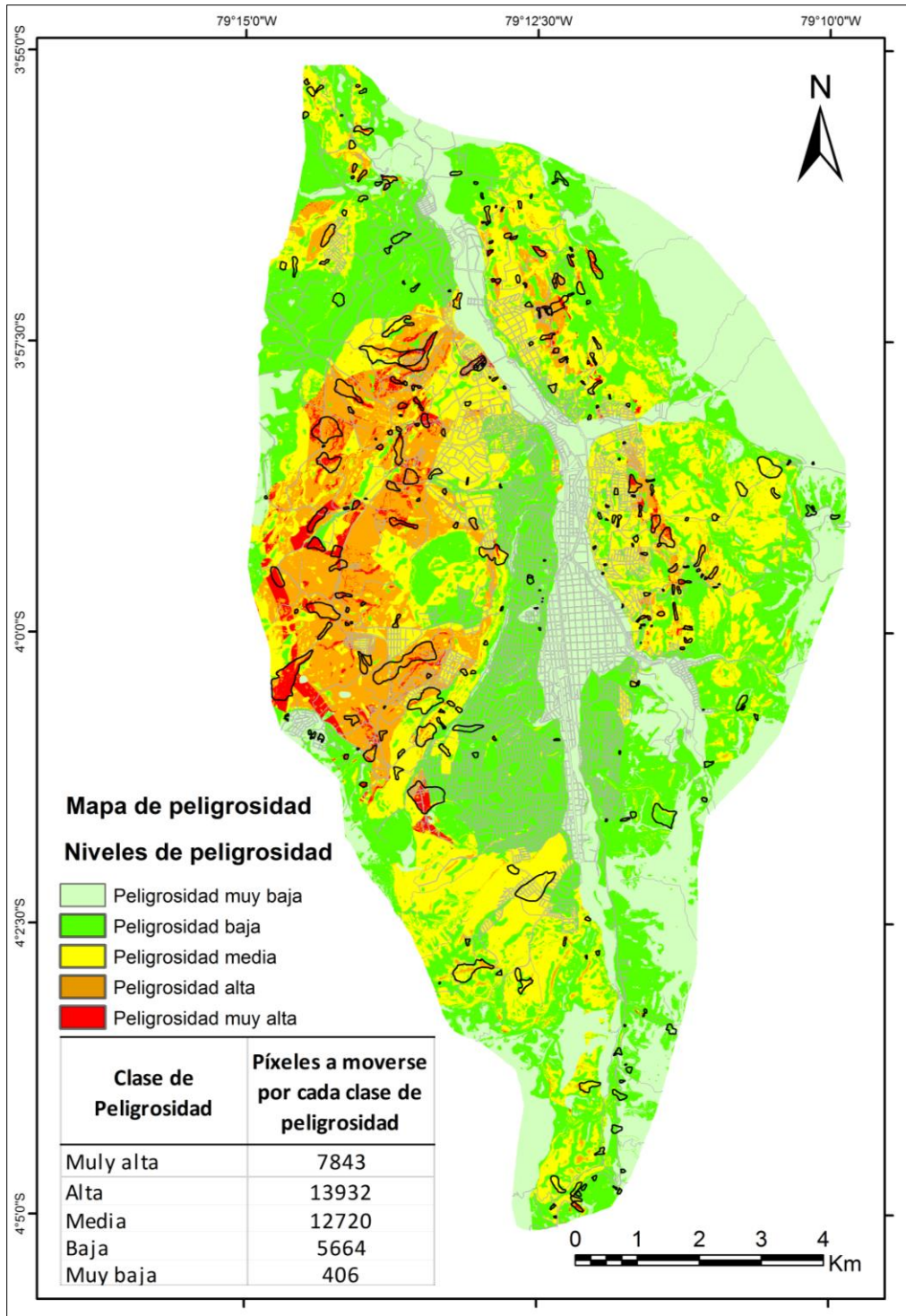


Figura 124. Mapa de peligrosidad a los movimientos de ladera con la ubicación de los movimientos de ladera inventariados.

Gracias a que el mapa de peligrosidad generado es totalmente cuantitativo, podemos a partir de él, hacer unas cuantas observaciones sobre el pronóstico que representa y obtener datos útiles para la gestión del riesgo. Para ello en base al inventario realizado, se ha estudiado la distribución del tamaño de los movimientos de ladera en la zona de estudio (Tabla 22).

Tabla 22. *Distribución de tamaños de movimientos de ladera en el inventario*

Tamaño de movimientos de ladera	Área (ha)	Área media (píxeles)	%
Muy grandes	25-15	23486	21%
Grandes	15-5	9436	30%
Medios	5-1.5	3293	21%
Pequeños	1.5-0.5	974	22%
Muy pequeños	<0.5	205	7%

En primer lugar, el modelo está clasificado en 5 clases de peligrosidad, cada una con un valor en cada píxel que se refiere a la probabilidad anual de que ese punto se mueva (Tabla 23). Ese valor de probabilidad se toma siguiendo la interpretación más sencilla de la probabilidad que se denomina frecuentista. Así, según la interpretación frecuentista la probabilidad se entiende como frecuencia de las veces que se repite un evento en un tiempo determinado. Si la probabilidad es anual tiene el valor 1 significa que el evento ocurrirá 1 vez al año. Si su valor es 0,1, la frecuencia es 1/10 o lo que es lo mismo el evento se espera que ocurra al menos una vez cada 10 años y, por tanto, cada año existe una probabilidad del 10 % de que ocurra.

Sumando el valor de los píxeles en una clase obtenemos el total de píxeles que se van a mover anualmente en el área cubierta por esa clase. Así, si la probabilidad en un píxel es 0,1 y la clase que contenga ese píxel tiene 10 píxeles con ese mismo valor, podemos esperar que en el área cubierta por esos píxeles al menos uno de ellos se mueva cada año ($0,1 \times 10 = 1$). Tomando como base

esos sencillos cálculos podemos destacar que en la zona donde se agrupan las tres clases con más peligrosidad (de media a muy alta), que ocupan el 38% del área de estudio (4.100 ha) (Tabla 22), se espera que se concentren la mayoría (85%) de los píxeles que se vayan a mover anualmente (34.494 píxeles). Por otro lado, existe una zona relativamente segura (peligrosidad muy baja) que ocupa el 25% del área de estudio (2.698 ha) donde el modelo pronostica que solamente se deslizarán el 1% de los píxeles que se muevan al año (0,4 ha). Entre esas dos grandes zonas existe una clase de baja peligrosidad que ocupa un área similar a las tres clases de mayor peligrosidad juntas (37%) donde el modelo indica que pueden localizarse el 14% (5 ha) de los píxeles que podrán moverse cada año (Tabla 22).

Tabla 23. Estimaciones de píxeles movidos anualmente por clase de peligrosidad.

Clase de Peligrosidad	% área por clase	% área por zona	Píxel movidos por clase	Píxeles movidos por zona	% píxeles movidos por clase
Muy alta	2%		7842		19.3
Alta	11%	38%	13931	34494	34.3
Media	24%		12719		31.4
Baja	37%	62%	5664	6070	14.0
Muy baja	25%		406		1.0

Con esos mismos datos y tomando la distribución de tamaños de los movimientos del inventario (Tabla 22) podemos hacer una estimación de los movimientos que se van a mover anualmente en cada una de estas zonas. Repartiendo los píxeles movidos entre diferentes categorías de tamaños de movimientos observadas en la zona de estudio podemos estimar groseramente el número de movimientos que podemos esperar en el área cubierta por cada clase de peligrosidad. Según esa estimación, podemos esperar que en el área ocupada por las tres clases de mayor peligrosidad (media, alta y muy alta) ocurran o se reactiven alrededor de 22 movimientos al año y en la zona de baja y muy baja peligrosidad sean alrededor de 4 (Tabla 24).

Tabla 24. *Estimaciones del número de movimientos de ladera anuales por clase de peligrosidad.*

Tamaños de movimientos de ladera	Área (ha)	%	Peligrosidad media a muy alta	Mov. de ladera al año	Peligrosidad baja a muy baja	Mov. de ladera al año
Muy grandes	25-15	21	7268	0	1279	0.1
Grandes	15-5	30	10220	1	1799	0.2
Medios	5-1.5	21	7134	2	1255	0.4
Pequeños	1.5-0.5	22	7615	8	1340	1.4
Muy pequeños	< 0.5	7	2257	11	397	1.9
Total de movimientos de ladera				22		3.9

6.4 VALIDACIÓN PRELIMINAR

Al inicio del año 2018 se ha realizado una actualización del inventario de movimientos de ladera en base a cartografía de campo y se han obtenido 45 movimientos de ladera nuevos y reactivados entre los años 2016 y 2017. Esto permite realizar un análisis preliminar de validación del modelo de peligrosidad generado. Para ello se ha realizado una primera aproximación simplificando el modelo en dos zonas, una de peligrosidad alta y otra baja, ya que con dos años de registro los datos resultan todavía escasos para evaluar un modelo propuesto al menos para la próxima década. No obstante, también se ha evaluado el modelo de cinco clases para conocer aproximadamente su grado de ajuste.

6.4.1. Datos generales sobre píxeles que se van a mover.

Un modelo simple de dos zonas pronostica con precisión el porcentaje de píxeles que se movieron en cada zona en 2016-17 (Tabla 25).

Tabla 25. *Porcentaje de píxeles movidos por clase (Modelo simple)*

Clase	Peligrosidad	Area	Modelo	Realidad
5-4-3	Alta	38%	85%	85%
2-1	Baja	62%	15%	15%

El pronóstico del modelo de cinco clases se aproxima bastante a lo ocurrido. Se desvía más en la clase de peligrosidad media pero las clases de peligrosidad baja y muy baja las define correctamente (Tabla 26).

Tabla 26. *Porcentaje de píxeles movidos por clase (Modelo 5 clases)*

Clase	Peligrosidad	Area	Modelo	Realidad
5	Muy Alta	2%	19%	12%
4	Alta	11%	34%	31%
3	Media	24%	31%	43%
2	Baja	37%	14%	15%
1	Muy baja	25%	0%	1%

En cuanto a la cantidad de píxeles movidos, durante los años 2016-17 se movieron mucho menos las laderas de lo que pronostica el modelo (un 60% menos). Esto posiblemente está relacionado directamente con la lluvia caída durante el año 2016 que es de 768 mm anuales y la del año 2017 que es de 782 mm anuales, valores que están por debajo de la media anual que es de 938 mm de lluvia (Tabla 20). Es decir, se trata de años más secos, por tanto es coherente con la disminución de los movimientos de ladera en esos años.

6.4.2. Pronóstico sobre número y tamaño de los movimientos de ladera.

En cuanto a pronosticar en cada zona el número de movimientos de ladera y su tamaño, resulta que el modelo simple de dos clases pronostica bastante bien lo que se ha visto durante 2016 y 2017 (Tabla 27).

En el 2016-2017 hubo menos movimientos de ladera y, sobre todo, no se generaron o reactivaron los grandes en la zona de alta peligrosidad. Al no reactivarse los grandes movimientos de ladera incide en el área movilizada total y por esa causa el número de píxeles movidos pronosticado es mayor que el real. En el caso que en un año más húmedo se reactive algún gran movimiento de ladera, el número de píxeles movidos aumentará bruscamente.

Tabla 27. Número de movimientos de ladera por tamaño en cada clase del modelo simple (dos años).

Zonas 5-4-3 - Alta peligrosidad			
Tamaño de movimientos de ladera	Área	Modelo	Realidad
Muy grandes	25-15ha	0	0
Grandes	15-5ha	2	0
Medios	5-1.5ha	4	4
Pequeños	1.5-0.5ha	16	10
Muy pequeños	<0.5ha	22	27
TOTAL		44	41

Zonas 2-1 - Baja peligrosidad			
Tamaño de movimientos de ladera	Área	Modelo	Realidad
Muy grandes	25-15ha	0	0
Grandes	15-5ha	0	0
Medios	5-1.5ha	0	0
Pequeños	1.5-0.5ha	3	3
Muy pequeños	<0.5ha	4	7
TOTAL		7	10

El modelo se ha diseñado para reflejar una media de una o dos décadas al menos. Necesitaríamos un registro mayor para conocer su capacidad real de pronóstico. Sin embargo, podemos decir que mirando el registro de los dos años siguientes a la realización del modelo, parece que lo ocurrido se ajusta razonablemente bien a lo pronosticado. En general, se puede ver como los datos registrados están en el mismo rango y en algunos casos se ajustan perfectamente al pronóstico.

CAPÍTULO VII

DISCUSIÓN GENERAL

Un gran número de movimientos de ladera que generan víctimas mortales ocurren en el entorno geológico específico de cuencas intramontañosas de la Cordillera de los Andes. Estas cuencas tienen características geográficas y geológicas similares que explican la alta incidencia de estos fenómenos (Marocco 1994). Presentan un clima tropical húmedo y contienen rocas sedimentarias continentales de grano fino depositadas en ambientes fluviales y lacustres. Cuando se combinan estas características suelen generar condiciones de inestabilidad en el suelo (Ibadango et al. 2005). Esto último, combinado con el rápido desarrollo urbano que se ha producido en esas áreas, implica situaciones con alto riesgo de movimientos de ladera. En este trabajo se ha hecho un análisis a diferentes escalas utilizando cuatro casos, que se analizan con detalle, para caracterizar los movimientos de ladera en la Cuenca de Loja.

Las observaciones pueden servir también de referencia para comprender el mecanismo y la cinemática de los movimientos de ladera observados en esta cuenca y en otros entornos geológicos similares de los Andes. Las mediciones de DGPS y ERT, combinadas con una detallada evaluación geomorfológica, revelan que los movimientos estudiados son lentos, de tipología compleja pero con una fuerte componente de flujo de tierra (Hungry et al. 2014).

Los análisis geotécnicos y mineralógicos muestran que los minerales arcillosos del grupo de la esmectita han contribuido significativamente tanto a la generación de planos de deslizamiento como a la ubicación de estos planos en zonas con mayor contenido de este tipo de arcillas de alta plasticidad. Los movimientos en estos materiales (casos de "La Florida" y "El Plateado") muestran ratios de desplazamiento de hasta m/año en pendientes con gradientes bajos (10-15°). Por otro lado, el movimiento de ladera "San Cayetano" presenta ratios de desplazamiento de cm/año, aunque el gradiente de la pendiente subyacente es de 20°, porque las arcillas activas (expansivas) son menos abundantes en los materiales afectados por el movimiento de ladera. Los

desplazamientos observados en el movimiento de ladera "Chontacruz" (4,6 m/año) se explican por el alto gradiente de pendiente (40°).

Aunque es importante para la comprensión de la cinemática de los movimientos de ladera, las caracterizaciones mineralógicas de los materiales involucrados en estos procesos, solamente se han realizado en unos pocos estudios (Shuzui 2001; Wen et al. 2004; Baoping y Haiyang 2007; Erginal et al. 2009; Regmi et al. 2014; Jiang et al. 2015; Strauhal et al. 2016). En nuestros casos de estudio, gracias a la caracterización mineralógica, hemos comprendido por qué los movimientos se desarrollaron en laderas con gradientes bajos (<20°). Los altos contenidos de montmorillonita-beidellita (esmectitas) han conferido una plasticidad muy alta a los materiales involucrados en los movimientos, haciendo que tengan valores bajos en términos de su cohesión y ángulos de fricción interna. El comportamiento expansivo de estas arcillas puede ser un factor condicionante de gran trascendencia por el clima tropical en el área de estudio. Anteriormente, Ibadango et al. (2005) había determinado, utilizando perforaciones, que el plano de falla de un movimiento de ladera ubicado a 200 m del movimiento de ladera "Chontacruz" se desarrolló en estratos que contenían arcillas de alta plasticidad. Nuestra observación en el área de estudio señala que es una característica general de la zona.

La montmorillonita-beidellita es un mineral de arcilla que se asocia con ambientes sedimentarios lacustres, como el representado por las Formaciones San Cayetano, Belén y Trigal encontradas en la Cuenca de Loja. Este tipo de depósito es común en las otras cuencas intramontanas neogénas de los Andes, lo que explicaría por qué los fenómenos de movimientos de ladera observados en Loja son similares a los descritos en otras cuencas del Ecuador como la de Cuenca, Azogues y Vilcabamba-Malacatos, así como en otros lugares de los Andes donde afloran litologías similares. Así, las características de los movimientos de ladera de Loja, aquí definidas, en términos generales pueden

ser utilizadas para pronosticar el comportamiento futuro de los movimientos de ladera que ocurren en otras cuencas intramontañosas andinas.

El análisis de estos casos también ha proporcionado información valiosa sobre la evolución futura de los movimientos de ladera estudiados que se pueden utilizar para evitar daños adicionales. Las mediciones DGPS revelaron movimientos precursoros consistentes con el desplazamiento de los movimientos de ladera fuera de los cuerpos de deslizamiento identificados. Esto es indicativo de una futura progresión de los movimientos de ladera y tiene implicaciones importantes para la gestión de riesgos. Las medidas de emergencia o de evacuación pueden ser llevadas a cabo antes de que ocurra un movimiento catastrófico en las áreas donde hemos detectado el desplazamiento.

En este trabajo se demuestran las ventajas de un procedimiento sencillo y barato que puede servir de referencia para la realización de nuevas caracterizaciones de deslizamientos para evitar futuras pérdidas en la región andina. Las técnicas geofísicas (ERT y DGPS) proporcionan un diagnóstico rápido y de bajo costo de las inestabilidades que pueden ayudar a tomar decisiones rápidas con respecto a la gestión del riesgo. Las caracterizaciones geotécnicas, mineralógicas y el análisis del umbral de lluvia sirven para predecir la evolución futura de los deslizamientos y sugerir medidas de mitigación adecuadas.

A nivel de país y sobre la base de una revisión cuidadosa de las metodologías utilizadas para la generación de mapas de susceptibilidad y peligrosidad, sobre todo la utilizada en el proyecto “Generación de Geoinformación para la Gestión del Territorio a nivel Nacional”, se aplica la metodología de tipo heurística, que consiste en ponderaciones basadas en el criterio del experto. Por el contrario, este estudio aplica otras metodologías probadas satisfactoriamente en otras regiones del mundo, permitiendo comparar los resultados alcanzados.

Los resultados de la susceptibilidad permiten concluir que los mejores modelos predictivos son los que incorporan las variables de litología, fallas, pendiente, relieve, uso del suelo e índice de posición topográfica (TPI). Lo que significa que estos factores tienen una relación directa con las variables categóricas. Por tanto, los modelos de predicción pueden mejorar, mejorando la información sobre esas variables.

La superposición del modelo de peligrosidad con los movimientos de ladera generados en el inventario (Figura 124) permite ver que la gran mayoría de los movimientos coinciden con las zonas de media y alta peligrosidad. Sin embargo, en la parte sur del área de estudio el modelo nos arroja unas clases de susceptibilidad de media a baja, lo que nos es coherente con la cantidad de movimientos de ladera ocurridos en esa zona, ya que podría definírsela como zona de alta peligrosidad. Esta incoherencia podría deberse al escaso valor de correlación que tiene la pendiente (0,6) en el modelo. Esto le restaría valor predictivo en zonas de pendientes altas como serían las áreas donde no se ajusta el modelo.

El peso de la influencia de las actividades humanas es posible que haya sido infraestimado dado que la única variable que la representa es el uso de suelo. No se puede descartar la influencia que pueda ejercer otras actividades humanas en la generación de este tipo de eventos, habida cuenta de la demanda de territorio que ejerce la expansión urbana y poblacional, lo que genera constantemente actividades como: excavaciones, rellenos, construcción de urbanizaciones nuevas, apertura de vías, actuaciones forestales, actividades agrícolas que conlleva también modificaciones hidrológicas, etc. Estas acciones pueden actuar como agentes preparatorios, que sin ser los causantes directos de los movimientos de ladera, en combinación con otros agentes desencadenantes como la lluvia contribuyen a aumentar la cantidad de movimientos de ladera.

Como se ha determinado en el análisis de los 4 casos señalados, los afloramientos de litologías arcillosas tienen una gran influencia en la inestabilidad de las laderas en la ciudad de Loja, pues esto también se evidencia en el modelo de susceptibilidad, dado que la litología tiene una muy buena correlación y además, de acuerdo con el inventario, son las zonas donde también se generan muchos movimientos de ladera. El uso del suelo igualmente es una variable de alta correlación con el modelo generado, de acuerdo con el inventario las zonas de pastizales y cultivos son las que mayormente condicionan la estabilidad de las laderas, tal como se refleja en el inventario de los movimientos de ladera.

Con respecto al análisis de factores desencadenantes (lluvias, sismicidad, fusión de nieve, actividad antrópica, etc.) son los que generan cambios en la estabilidad de las laderas en lapsos de tiempo muy cortos, por tanto son los que desencadenan los movimientos de ladera con diferentes niveles de intensidad (Corominas y Moya 2008).

Los umbrales de precipitación calculados mediante el análisis de series temporales en estos movimientos de ladera, son consistentes con las observaciones mencionadas anteriormente. Las precipitaciones no muy lejos de la media pueden desencadenar o reactivar estos movimientos. Esto representa una situación problemática con respecto a los movimientos de ladera en el Valle de Loja y a otras cuencas neógenas andinas, debido a que estas áreas presentan abundantes lluvias y altos niveles de humedad relativa. Estas características explican el gran número de movimientos de ladera inventariados en el Valle de Loja que repetidamente causan daños en la infraestructura y áreas urbanas. Por tanto, la producción de un mapa de peligrosidad frente a movimientos de ladera en estas zonas debe ser una prioridad para que sirva de soporte a la planificación urbana futura. Los resultados de este estudio ayudarán en este sentido.

A pesar de que se ha tratado una base de datos con un catálogo de 167 movimientos de ladera, las dificultades intrínsecas de este tipo de análisis limitó el número de movimientos a 153. Estos últimos fueron desencadenados por 93 eventos pluviométricos entre 2006 y 2015. Además, debido a la dificultad para acceder, organizar o extraer este tipo de información y sobre todo con lenguaje técnico que involucre datos como la determinación exacta del lugar, de la fecha, magnitud y duración de los eventos; puede aparejar de maneja implícita algunos errores en la información recabada.

Para analizar las peculiaridades de estos eventos meteorológicos, los Umbrales de Precipitación Crítica (CRTs) fueron estimados mediante el uso de Series de Duración Parcial (PDS). Este análisis permitió estudiar los valores de precipitación y sus periodos de retorno, no limitando los resultados a duraciones prefijadas de las precipitaciones registradas. En cambio, la metodología aplicada extrajo información sobre la intensidad de la lluvia y el período de retorno para cada evento de movimiento de ladera para duraciones comprendidas entre 1 y 90 días. Esta información sirvió para estimar curvas de CRTs que describen las condiciones que pueden desencadenar futuros movimientos de ladera en el área de estudio si el clima y el entorno geomorfológico permanecen sin cambios. Para el caso de estudio, una curva de CRT conservadora se representó con una función potencial que describe las condiciones mínimas esperadas (es decir, combinación entre duración y precipitación acumulada, y por ende, de la intensidad media) para desencadenar movimientos de ladera en el área de estudio. Para esto se partió de los valores de variables pluviométricas asociadas con la mayor intensidad media (m/d) encontrada entre las 90 combinaciones de duración-lluvia acumulada calculadas para cada caso en el que se dataron movimientos de ladera. Estos valores se usaron bajo el criterio de la tendencia general del aumento del periodo de retorno con el incremento de la intensidad media. No obstante, cabe señalar que parte de las fechas en las que se produjeron movimientos de ladera se asociaron con periodos de retorno bajos. Esto puede

explicarse por el tipo de movimientos de velocidad lenta dentro de unas condiciones de humedad y saturación altas en la zona de estudio, que con lluvia continuada y de poca magnitud podría cambiar el estado de deformación del suelo de elástico a plástico con substanciales incrementos de humedad.

Por otra parte, la recurrencia de los períodos de precipitación estudiados asociados a eventos de movimientos de ladera se comparó con los ciclos climáticos. Contrariamente a lo esperado, este estudio no encontró una correlación significativa entre los períodos de retorno estimados y los ciclos climáticos conocidos. Las causas principales que impiden esta correlación son: (1) los eventos con períodos de retorno más cortos se han repetido con más frecuencia de lo esperado de esos períodos de retorno, (2) algunos períodos de retorno coinciden al mismo tiempo con algún ciclo climático pero también con un armónico de otro ciclo climático y, (3) la longitud temporal del inventario de movimientos de ladera no permite comprobar la repetición cíclica de eventos con un período de retorno alto. Por tanto, es necesario aumentar el intervalo temporal del catálogo de movimientos de ladera para reconocer con mayor certeza la relación entre los ciclos climáticos y el desencadenamiento de movimientos de ladera.

En cuanto a la frecuencia de los movimientos de ladera en Loja, los resultados muestran que el 76% de los eventos de lluvia que provocan movimientos de ladera en el área de estudio tienen períodos de retorno de menos de un año y se concentran de febrero a abril. Esto refleja la alta frecuencia temporal de estos fenómenos potencialmente dañinos en el área de estudio. Cabe resaltar que el mayor número de movimientos de ladera del catálogo se han registrado en la serie reciente del 2011 al 2015. Dentro de esta serie se identificaron varios eventos de lluvia desencadenantes de múltiples movimientos de ladera (MORLES), asociándose a períodos de retorno medios de 2 a 10 años aproximadamente. Para el evento de mayor magnitud, registrado en marzo de

2015, se alcanzaron acumulaciones de precipitación de 190 a 238 mm, asociadas a duraciones de entre 11 y 15 días, e intensidades entre 16 mm/día a 17 mm/día. Para este caso, el máximo periodo de retorno obtenido fue de 17,3 años (lluvia acumulada de 190 mm en 10 días, y una intensidad de 19 mm/día).

Como se interpreta de los resultados, mediante un estudio retrospectivo, se han podido localizar diferentes escenarios o MORLEs asociados a eventos lluviosos de diferente periodo de retorno. Si bien la información se ha extraído a partir de una serie de años recientes (2011-2015), es muy probable que en la medida que estos eventos lluviosos se dieron en el pasado también desencadenaran un número igual o mayor de movimientos. Por otro lado, se ha observado un incremento general del 1% en la magnitud de la lluvia acumulada durante los meses más lluviosos (octubre – abril). Sin embargo, una segmentación de la información permite visualizar una tendencia en aumento en la primera parte del 2,2% (hasta el ciclo hidrológico 1989-1990), mientras que en la segunda parte la lluvia acumulada se estabiliza. Igualmente, dentro de la segunda división el periodo de retorno también se estabiliza, e incluso desciende, indicando una recurrencia común en la magnitud de la lluvia acumulada. No obstante, los movimientos o MORLEs que han podido ser datados y asociados con lluvias más inusuales dentro del periodo 2011-2015 corresponden a periodos de retorno altos.

En principio, para aplicar el modelo de peligrosidad es deseable que la ventana temporal de la predicción sea menor o igual que el rango temporal que abarcan los datos. En caso de disponer de información cronológica sobre la formación de movimientos de ladera para un intervalo relativamente amplio, se puede analizar la evolución temporal de la frecuencia del fenómeno e incorporar las pautas de evolución temporal de la misma en los modelos de peligrosidad. Es decir, se podrían formular escenarios de frecuencia de ocurrencias en el futuro

a partir del análisis de la evolución temporal de la frecuencia en el pasado (Remondo 2005; Bonachea 2006).

Según el análisis de series temporales de precipitación (ver capítulo V) se ha podido determinar si existían tendencias al aumento, a la disminución o al mantenimiento de las tasas de ocurrencia de eventos de lluvia generadores de movimientos de ladera. En relación a este análisis y como se ha discutido anteriormente, la serie anual de lluvia acumulada en los meses más lluviosos (octubre-abril) muestra un crecimiento general hasta el año hidrológico 1990-91, manteniéndose sin cambio apreciable durante el resto de la serie (hasta 2015). Este incremento sugiere que los movimientos de ladera, independientemente de su registro, mostraran una respuesta paralela a este cambio. Es decir, que estos hayan aumentado paralelamente al incremento de lluvia durante la primera parte de la serie, manteniéndose en la segunda división.

Es importante señalar que un mayor número de movimientos datados permitiría ajustar tanto las gráficas de umbrales activadores como la de peligrosidad expresada como frecuencia de movimientos en función de la magnitud de la precipitación esperada y su periodo de retorno. Igualmente, la adición de datos en el futuro posibilitará la confirmación de la tendencia a la estabilización, incremento o descenso de la magnitud de la lluvia registrada en la zona de estudio, lo que tendrá una relación directa sobre la peligrosidad de movimientos de ladera. Así mismo, un registro de precipitación más completo y espacialmente distribuido facilitaría el análisis de la influencia de los ciclos climáticos en la región estudiada y en la frecuencia de los movimientos de ladera.

Como se ha indicado anteriormente, aunque no se tiene constancia de algún movimiento de ladera que haya podido originarse en la zona como consecuencia de alguna sacudida sísmica. No se puede descartar que este fenómeno haya

tenido o tenga en el futuro alguna relación como desencadenante de este tipo de eventos, más aún si la región es sísmicamente activa. A pesar de las dificultades existentes y de las pocas fuentes para conseguir estos datos, se deben plantear esfuerzos institucionales a fin de recabar este tipo de información que se constituya luego en un punto de partida en programas o estrategias políticas nacionales o transnacionales con enfoque al análisis de la sismicidad como factor desencadenante de los movimientos de ladera.

Finalmente, los datos recabados a lo largo de este estudio se han integrado en un modelo de peligrosidad, el cual establece 5 rangos de peligrosidad. Estos datos se han agrupado en dos zonas, una (peligrosidad media a muy alta) en la cual se predice que 34.494,01 pixeles se moverían anualmente; y la otra (peligrosidad baja a muy baja); que estima que solo 6.070,49 pixeles se moverán al año. Según esa estimación, podemos esperar que en el área ocupada por las tres clases de mayor peligrosidad (media, alta y muy alta) ocurran o se reactiven alrededor de 22 movimientos de ladera al año y en la zona de baja y muy baja peligrosidad sean alrededor de 4 movimientos de ladera al año. De estos 26 movimientos de ladera, 19 serían de tamaños entre pequeños y muy pequeños (8 y 11 respectivamente).

Desde el punto de vista de la gestión esto supondría que sería altamente recomendable no construir en el área ocupada por las tres clases de mayor peligrosidad. Sin embargo, el contexto socio-económico en Loja impide ser tan restrictivos y se deberían plantear medidas intermedias refrendadas por los datos obtenidos a partir del modelo que podrían ser las siguientes:

- a. Restringir en lo posible la construcción en las dos clases de peligrosidad con valores mayores donde el modelo indica una ocurrencia o reactivación de al menos 1 mov./km²/año. Esa densidad indica que es altamente probable que un edificio o infraestructura en esa zona antes o después sean afectados

por un movimiento de ladera. La zona ocupa el 13% del área de estudio (14 km²) y sería asumible limitar su ocupación.

- b. Delimitar con detalle las zonas relativamente más seguras correspondientes a la tercera clase con mayor peligrosidad que ocupa 26 km², donde el modelo indica una ocurrencia o reactivación tres veces menor que en la zona anteriormente citada (0,3 mov./km²/año). Además, se deberían definir unos requisitos muy exigentes en los estudios previos a construir en esas zonas y/o contratar un programa de seguros obligatorio que pudiera afrontar las pérdidas en el caso de sufrir daños a causa de la movilización del terreno. Estas medidas serían disuasorias para llevar a cabo nuevos desarrollos urbanísticos. Se deberían invertir, además, recursos para implantar medidas de prevención como sistemas de monitorización y alarma en las áreas ya urbanizadas dentro de esta tercera clase de peligrosidad.
- c. Definir unos requisitos que tengan una cierta atención frente al peligro de movimientos de ladera en los estudios previos para construir en la zona de baja peligrosidad. Esta zona no presenta el nivel de amenaza de las tres anteriores pero no se puede bajar la guardia. La tasa de ocurrencia que indica el modelo es de 0,1 mov./km²/año, es decir, un movimiento de ladera al año por cada 10 km², lo que indica que el peligro existe aunque sea mucho menor que en el resto de la zona de estudio. Este dato refleja el alto grado de amenaza por movimiento de ladera al que está expuesta Loja.
- d. En la zona de muy baja peligrosidad la tasa de ocurrencia se reduce a un movimiento de ladera cada cuatro años y muy probablemente de pequeña magnitud. Esto indica lo altamente improbable que es que un movimiento de ladera cause daños en esa zona y por tanto la podemos considerar relativamente "segura".

Todas estas observaciones obtenidas a través del modelo de peligrosidad deberían contrastarse y completarse en el futuro mediante un modelo de riesgo en el que las pérdidas económicas y humanas se implementaran en el análisis. No obstante, este es un buen punto de partida desde el cual comenzar a plantear medidas de gestión del riesgo frente a movimientos de ladera en la localidad de Loja y la base principal para un modelo de riesgo.

El que existan zonas con baja peligrosidad no debe considerarse como terrenos totalmente estables, sino que se encuentran en un estado inactivo desde el punto de vista natural. Por tanto, al ser terrenos susceptibles, los movimientos de ladera se pueden reactivar en cualquier momento por agentes externos (por ejemplo, la actividad humana).

CAPÍTULO VIII

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

- Para el análisis de susceptibilidad realizado en este estudio se considera a los movimientos de ladera como un todo, asociado a tipologías reptación-flujo.
- El inventario multitemporal refleja que en el periodo 1999-2003 la cantidad total de área movida corresponde a 53 ha, en el periodo 2003-2010 se movió un total de 116 ha y en el periodo 2010-2015 el área movida es de 286 ha. Estos datos evidencian el incremento de área movida en más del doble entre cada periodo de tiempo analizado. Este incremento está relacionado con el aumento de las precipitaciones medias mensuales en el periodo 2010-2015.
- El estudio exhaustivo de cuatro movimientos de ladera que han ocurrido en Loja (Ecuador) ha servido para formular un modelo conceptual detallado de los movimientos de tierras comunes que ocurren en esta área. Aunque, en general, se trata de movimientos lentos, según las mediciones DGPS, tres de ellos muestran velocidades considerables con respecto a su potencial de daño (alrededor de 3-7 m/año). Los tamaños pueden considerarse moderados, si bien los movimientos analizados son principalmente superficiales, como muestran los perfiles de ERT. Los análisis geotécnicos y mineralógicos demuestran que el principal factor condicionante es la presencia de minerales arcillosos activos en las formaciones geológicas involucradas. Estas arcillas explican por qué las pendientes de bajo gradiente fallaron después de períodos de precipitación que no fueron excepcionalmente intensivos.
- El análisis de susceptibilidad muestra resultados muy similares utilizando la metodología de “Likelihood ratio” y la de la “Matriz”. El mejor modelo de susceptibilidad se ha obtenido con el cruce de tan solo 6 factores condicionantes (*fallas, litología, pendiente, geomorfología, TPI, uso del suelo*), cuyo coeficiente de validación es de 0,77 para ambos métodos. Con

la diferencia de que el método “Likelihood ratio” es más conservador en la predicción de las zonas de alta susceptibilidad, mientras que el de la matriz es más conservador en las zonas de baja susceptibilidad.

- El modelo de susceptibilidad indica que las zonas más susceptibles (de media a muy alta) frente a los movimientos de ladera se localizan en la parte centro-occidental y en la parte centro-oriental. Las cuales corresponden a un área de 4.310 ha de terreno, que equivale al 40% del área estudiada. Los grados de ajuste calculados garantizan la fiabilidad de los dos métodos utilizados.
- El haber determinado que el uso de suelo es un factor condicionante con una buena correlación en el modelo de susceptibilidad, especialmente en las zonas de pastizales y cultivos donde mayormente se generan los movimientos de ladera (64% y 15,8% respectivamente), implica que la actividad antrópica asociada a estas frecuentes labores tiene influencia directa en la inestabilidad de las laderas.
- A pesar de no haberse podido definir un umbral característico como detonante de los movimientos de ladera, se concluye que cuando caen lluvias continuas en un periodo de 11 a 15 días con una precipitación acumulada entre 190 y 238 mm, se generan movimientos de ladera, dado que en este periodo de lluvias el suelo alcanza límites de sobresaturación actuando como una variable preparatoria para la generación de los movimientos de ladera. Por lo que es frecuente que en la ciudad de Loja se produzcan estas condiciones anualmente.
- De los resultados de la peligrosidad se concluye que la zona donde se agrupan las tres clases con más peligrosidad (de media a muy alta) y que ocupan el 38% del área de estudio (4.100,9 ha), se espera que 31 ha vayan

a moverse anualmente. Mientras que en la zona relativamente segura (peligrosidad muy baja) que ocupa el 25% del área de estudio (2.698 ha), el modelo pronostica que solamente se movilizarán 0.4 ha al año. Repartiendo los píxeles movidos entre diferentes categorías de tamaños de movimientos de ladera observados en la zona de estudio, se puede estimar el número de movimientos que cabe esperar en el área cubierta por cada clase de peligrosidad. Según esa estimación, en el área ocupada por las tres clases de mayor peligrosidad (media, alta y muy alta) se generarán o se reactivarán alrededor de 22 movimientos al año, mientras que en la zona de baja y muy baja peligrosidad será alrededor de 4 movimientos.

- Una primera evaluación del modelo de peligrosidad, utilizando los movimientos de ladera ocurridos en los años 2016 y 2017, indica que los píxeles movilizados en la realidad se ajustan razonablemente bien a lo pronosticado por el modelo. Esto pone de manifiesto que las metodologías aplicadas y las variables consideradas han generado un modelo que, a raíz de esa primera evaluación, parece presentar una alta fiabilidad.

LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

- La aplicación más directa del mapa de peligrosidad, obtenido como resultado de esta investigación, es su utilización como un instrumento de apoyo para la planificación y ordenamiento territorial de la ciudad de Loja en función del plan de desarrollo y crecimiento urbano que contribuya a la prevención de futuras pérdidas socio-económicas potenciales, utilizándolo como base para la generación de medidas restrictivas o preventivas.

Además, el trabajo realizado permite abrir varias líneas de investigación futura:

- Mejorar la estimación de la susceptibilidad y la peligrosidad incorporando o mejorando variables; así como el uso de otras técnicas. Por ejemplo:
 - Incorporar una variable de análisis estructural de los estratos, la actividad antrópica y mejora de la caracterización geotécnica y mineralógica de la litología.
 - Actualizar la variable uso del suelo, puesto que es cambiante constantemente.
 - Utilizar técnicas de teledetección avanzadas como la interferometría de radar (InSAR) o el LIDAR que podrían contribuir a mejorar el inventario de movimientos de ladera y su evolución cinemática.
 - Profundizar en el análisis de umbrales de lluvia, incorporando mayor número de movimientos datados y determinar la relación de la lluvia con la infiltración y el grado de saturación del suelo como factor activador de movimientos de ladera.
 - Incorporar un análisis de la sismicidad como agente desencadenador de movimientos de ladera, considerado el hecho de que el área de estudio está ubicada en una zona sísmicamente activa.

- Incorporar estudios sobre la vulnerabilidad y la valoración económica y social de los elementos del territorio, con objeto de avanzar hacia el análisis del riesgo frente a los movimientos de ladera, que permita estimar el grado de pérdidas asociado a estos procesos.
- Generar Sistemas de alerta temprana y diseñar medidas de mitigación apropiadas y optimizadas simulando diferentes alternativas utilizando modelos numéricos que permitan incorporar los umbrales lluvia generados en este trabajo.

Como última reflexión, cabe decir que el territorio siempre ha sido, es y será afectado por fenómenos naturales y actividades antrópicas que a veces son muy agresivos y que en mayor o menor medida afectan profundamente el territorio hasta el punto de poner en peligro su integridad y consigo toda infraestructura establecida en él y limitando su uso, como este estudio lo pone en evidencia. Por ello, cada vez es más necesario que el presupuesto en cualquier nivel de gobierno (municipal, provincial, regional o nacional) incluya recursos financieros específicos dedicados al diagnóstico del territorio, aunque solo sea para actualizar mapas de inventarios de movimientos de ladera, mapas de uso del suelo, dataciones, etc., que luego contribuyan a generar buenos modelos de uso del suelo y ordenamiento territorial que es fundamental para el desarrollo urbano. Por lo tanto, la prevención mediante la realización de mapas de susceptibilidad, peligrosidad y zonificación del riesgo, creación de sistemas de alerta temprana y la gestión del territorio, constituyen las medidas más viables para minimizar la pérdida de vidas y daños a diversas infraestructuras y afectación social. En este contexto el estudio realizado pretende sentar las bases para llevar a cabo un proyecto con ese objetivo en la ciudad de Loja.

BIBLIOGRAFIA

- Abad, F. (2006). “Ensayo metodológico para la evaluación y zonificación de la amenaza por fenómenos de remoción en masa, Cuenca de Loja”, (Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador).
- ABEM (2010). Instruction Manual Terrameter SAS 4000/SAS 1000. ABEM Instrument AB, Sundbyberg, Sweden (148 pp.).
- Abidin, H.Z., Andreas, H., Gumilar, I., Fukuda, Y., Pohan, Y.E., Deguchi, T. (2011). Land subsidence of Jakarta (Indonesia) and its relation with urban development. *Nat Hazards* 59:1753–1771. doi: 10.1007/s11069-011-9866-9.
- Acar, M., Ozludemir, M.T., Erol, S., Celik, R., Ayan, T. (2008). Kinematic landslide monitoring with Kalman filtering. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 8:213–221. doi: 10.5194/nhess-8-213-2008.
- Acar, M. (2010). Determination of strain accumulation in landslide areas with GPS measurements. *Sci Res Essays* 5:763–768.
- Agterberg, F.P., Bonham-Carter, G.F., Wright, D.F. (1989). Weights of evidence modelling: a new approach to mapping mineral potential. In: Agterberg FP, Bonham-Carter GF (eds) *Statistical applications in the earth sciences*. *Geol Surv Can* 89(9):171-183.
- Agterberg, F.P., Bonham-Carter, G.F., Cheng, Q., Wright, D.F. (1993). Weights of evidence modelling and weighted logistic regression for mineral potential mapping. In: Davis JC, Herzfeld UC (eds) *Computer in geology, 25 years of progress*. Oxford University Press, Oxford, pp13-32.
- Alcántara Ayala, I. (2000). Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. *Investigaciones geográficas*, (41), 7-25.
- Alcántara-Ayala, I., & Oliver-Smith, A. (2014). ICL Latin-American Network: on the road to landslide reduction capacity building. *Landslides*, 11(2), 315-318.
- Aleotti, P., & Chowdhury, R. (1999). Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bull Eng Geol Environ* 58(1):21-44. doi:10.1007/s100640050066.

- Alestalo, J. (1971). Dendrochronological interpretation of geomorphic processes. *Fennia* 105:1-140.
- Aleotti, P., & Polloni, G. (2003). Two-dimensional model of the 1998 Sarno debris flows (Italy): preliminary results. In *Third International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment. Davos, Switzerland* (pp. 553-563).
- Alzate, J.B. & Escobar, A.E. (1992). “Adquisición de datos para un SIG”. Proc. Simposio Internacional sobre Sensores Remotos y sistemas de Informac Geográfica para el Estudio de Riesgos Naturales, Bogotá, Colombia. 449-465.
- Anbarasu, K., Sengupta, A., Gupta, S., & Sharma, S. P. (2010). Mechanism of activation of the Lanta Khola landslide in Sikkim Himalayas. *Landslides*, 7(2), 135-147.
- Aristizábal, E., García, E., & Martínez, C. (2015). Susceptibility assessment of shallow landslides triggered by rainfall in tropical basins and mountainous terrains. *Natural Hazards*, 78(1), 621-634.
- Arnould, M., & Frey, P. (1977). Analyse détaillée des réponses à l'enquête internationale sur les glissements de terrain. *Report to Unesco (with Summary in English)*.
- Azañón, J.M., Azor, A., Yesares, J. Tsige, M., Mateos, R.M., Nieto, F., Delgado, J., López-Chicano, M., Martín, W., Rodríguez-Fernández, J. (2010). Regional-scale high-plasticity clay-bearing formation as controlling factor on landslides in Southeast Spain. *Geomorphology* 120:26–37. doi: 10.1016/j.geomorph.2009.09.012.
- Ayalew, L., & Yamagishi, H. (2005). The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology* 65:15-31. doi:10.1016/j.geomorph.2004.06.010.
- Baeza, C. (1994): “Evaluación de las condiciones de rotura y la movilidad de los deslizamientos superficiales mediante el uso de técnicas de análisis multivariante”. Tesis Doctoral. Univ. Pol. Catalunya.
- Baoping, WEN & Haiyang, CHEN (2007). Mineral compositions and elements concentrations as indicators for the role of groundwater in the development of landslide slip zones: a case study of large-scale landslides in the Three Gorges area in China. *Earth Science Frontiers* 14(6):98-106.

- Beguería, S. (2006). Validation and evaluation of predictive models in hazard assessment and risk management. *Natural Hazards*, 37(3), 315-329.
- Benac, Č., Arbanas, Ž., Jurak, V., Oštrić, M., & Ožanić, N. (2005). Complex landslide in the Rječina valley (Croatia): origin and sliding mechanism. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 64(4), 361.
- Bernknopf, R.L., Campbell, R.H., Brookshire, D.S., Shapiro, C.D. (1988). A probabilistic approach to landslide hazard mapping in Cincinnati, Ohio, with applications for economic evaluation. *Bulletin of the American Association of Engineering Geologists* 25: 39–56.
- Beven, K.J. and Kirkby, M.J. (1979). A physically based variable contributing area model of basin hydrology, *Hydrol. Sci. Bull.*, 24(1), 43–69.
- Blackman, R.B., Tukey, J.W. (1958). The measurement of power spectra from the point of view of communications engineering. *Bell System Technical Journal*, 37(1):185–282.
- Borga, M., Dalla Fontana, G., Cazorzi, F. (2002). Analysis of topographic and climatic control on rainfall-triggered shallow landsliding using a quasi-dynamic wetness index. *J Hydrol* 268(1–4):56–71. doi:10.1016/s0022-1694(02)00118-x.
- Bocco, G., & Riemann, H. (1997). Quality assessment of polygon labeling. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 63(4), 393-395.
- Bosque-Sendra, J. (1992). *Sistemas de información geográfica*. Ed Rialp SA, Madrid. ISBN: 84-321-3154-7.
- Bosque Sendra, J., Gómez Delgado, M., Rodríguez Durán, A. E., Rodríguez Espinosa, V. M., & Vela Gayo, A. (1997). Valoración de los aspectos visuales del paisaje mediante la utilización de un sistema de información geográfica. *Documents d'anàlisi geogràfica*, (30), 0019-038.
- Bonachea Pico, J. (2006). Desarrollo, aplicación y validación de procedimientos y modelos para la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo debidos a procesos geomorfológicos. Universidad de Cantabria.
- Bonham-Carter, G.F., Agterberg, F.P., Wright, D.F. (1988). Integration of geological data sets for gold exploration in Nova Scotia. *Photogram Eng Remote Sens* 54:1585–1592.

- Brabb, E.E. Pompeyan, E.H., and Bonilla, M.G. (1972). Landslide susceptibility in San Mateo County, California, *US Geological Survey Miscellaneous Field Studies Map*, MF-360, scale 1:62.500.
- Brabb, E.E. (1984). *Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping*.
- Brabb, E.E. (1991). The world landslide problem. *Episodes*, 14 (1):52-61.
- Bravo, D. (2012). Caracterización Geológica-Geotécnica de los Movimientos de Ladera de los sectores El Plateado y San Cayetano Bajo con aplicación de Tomografía Eléctrica y técnicas GPS Diferencial. Trabajo de fin de titulación. Universidad Técnica Particular de Loja.
- Bracken, I. and Webster, C. (1990). *Information technology in geography and planning including principles of GIS*. London: Routledge.
- Brenning, A., Schwinn, M., Muenchow, J. (2015). Landslide susceptibility near highways is increased by 1 order of magnitude in the Andes of southern Ecuador, Loja province. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(1):45-57.
- Brückl, E., Brunner, F.K., Kraus, K. (2006). Kinematics of a deep-seated landslide derived from photogrammetric, GPS and geophysical data. *Eng Geol* 88:149–159. doi: 10.1016/j.enggeo.2006.09.004.
- Brunsdon, D. (1979). Weathering. *Process in geomorphology*, 73-129.
- Burrough, P.A. (1986). *Principles of geographic information systems for land resource assessment*. Oxford: Clarendon Press.
- Bussmann, R.W., Wilcke, W., Richter, M. (2008). Landslides as important disturbance regimes—causes and regeneration. In *Gradients in a tropical mountain ecosystem of Ecuador*. Springer, Berlin Heidelberg, pp 319-330.
- Cacoullos, T. (1973). *Discriminant Analysis and Applications*, Academic Press, New York, 434p.
- Calcaterra, S., Cesi, C., Di Maio, C., Gambino, P., Merli, K., Vallario, M., Vassallo, R. (2012). Surface displacements of two landslides evaluated by GPS and inclinometer systems: A case study in Southern Apennines, Italy. *Nat Hazards* 61:257–266. doi: 10.1007/s11069-010-9633-3.

- Canuti, P., Casagli, N. (1996). Considerazioni sulla valutazione del rischio dei frana. Estratto da "Fenomeni Franosi e Centri Abitati". Atti del Convegno di Bologna del 27 Maggio 1994. CNR-GNDICI-Linea 2 "Previsione e Prevenzione di Eventi Granosi a Grande Rischio". Pubblicazione no. 846.
- Cardinali, M., Reichenbach, P., Guzzetti, F., Ardizzone, F., Antonini, G., Galli, M.,... & Salvati, P. (2002). A geomorphological approach to the estimation of landslide hazards and risks in Umbria, Central Italy. *Natural hazards and earth system science*, 2(1/2), 57-72.
- Carrara, A., Merenda, L. (1974). Metodologia per un censimento degli eventi franoso in Calabria. *Geol Applicata Idrogeologica* 9:237-255.
- Carrara, A. (1983). Multivariate models for landslide hazard evaluation. *Mathematical geology*, 15(3), 403-426.
- Carrara, A. (1988). Multivariate models for landslide hazard evaluation. A "Black Box" approach. Workshop on Natural Disasters in European Mediterranean Countries, Perugia, Italy, pp205-224.
- Carrara, A. (1988). Drainage and divide networks derived from high-fidelity digital terrain models. In *Quantitative analysis of mineral and energy resources* (pp. 581-597). Springer, Dordrecht.
- Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V., & Reichenbach, P. (1990). Geographical information systems and multivariate models in landslide hazard evaluation. *Alps*, 90, 17-28.
- Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V., & Reichenbach, P. (1991). GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth surface processes and landforms*, 16(5), 427-445. doi: 10.1002/esp.3290160505.
- Carrara, A. (1992). *Landslide hazard assessment*. Proceed. 1st Simp. Inter. Sensores Remotos y Sistema de Inform. Geogr. Para el Studio de Riescos Natur., March 10–12, 1992, Bogota', 329-355.
- Carrara, A., Cardinali M., Guzzetti F. (1992). *Uncertainty in assessing landslide hazard and risk*. ITC Jour., v. 1992:2, 172–183.
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (1995). GIS technology in mapping landslide hazard. In *Geographical information systems in assessing natural hazards* (pp. 135-175). Springer Netherlands.

- Carrara, A., Bitelli, G., & Carla, R. (1997). Comparison of techniques for generating digital terrain models from contour lines. *International Journal of Geographical Information Science*, 11(5), 451-473.
- Carrara, A., Crosta, G., & Frattini, P. (2008). Comparing models of debris-flow susceptibility in the alpine environment. *Geomorphology*, 94(3), 353-378.
- Carrasco, R.M., Pedraza, J., Martin-Duque, J.F., Mattera, M., Sanz, M.A., & Bodoque, J.M. (2003). Hazard zoning for landslides connected to torrential floods in the Jerte Valley (Spain) by using GIS techniques. *Natural hazards*, 30(3), 361-381.
- CARE (2001). Seguridad de medios de vida de los hogares en Ecuador, Diagnóstico, Plan binacional de desarrollo de la región fronteriza, SNV, Servicio holandés de cooperación al desarrollo, Quito, 221p.
- Carrillo Jara Nathaly del Cisne (2010). El crecimiento urbano de la ciudad de Loja y su influencia sobre los recursos naturales circundantes. Tesis de pregrado, UNL.
- Casale, R., Fantecchi, R., Flageolet, J.C. (1994). Temporal occurrence and forecasting of landslides in the European Community. In: Casale R, Fantecchi R, Flageolet JC (eds) Final report. Programme Epoch (Ct. 90 0025). European Community, p 957.
- Cascini, L. (2008). Applicability of landslide susceptibility and hazard zoning at different scales. *Engineering Geology*, 102(3), 164-177.
- Cebrián, J.A., & Marck, D.M. (1986). Sistemas de información geográfica. Funciones y estructuras de datos. *Estudios Geográficos*, 47(184), 277.
- Cendrero, A., Díaz de Terán, J.R., Fernández, O., Garrote, R., González Lastra, J.R., Inoriza, I., Lüttig, G., Otamendi, J., Pérez, M., Serrano, A. & 'Grupo Ikerlana' (1987). Detailed geological hazards mapping for urban and rural planning in Vizcaya (Northern Spain). *Spec.Publ.geol. Survey Norway* 2: 25-41, Trondheim.
- Chacón, J., Soria, F.J. (1992). Inventario y caracterización de movimientos de ladera en la vertiente septentrional de Sierra Nevada. III Simposio Nacional de Taludes y Laderas Inestables, La Coruña. vol. 1:149-160.
- Chacón, J., Irigaray, C., Fernández, T. (1993). Methodology for large scale landslide hazard mapping in a G.I.S. In: Seventh international conference and field workshop on landslides, vol 1. Bratislava, Eslovaquia, pp77-82

- Chacón, J., Irigaray, C., El Hamdouni, R., Fernández, T. (1996). From the inventory to the risk analysis: improvements to a large scale G.I.S. method. In: Chacón J, Irigaray C, Fernández T (eds.) Landslides. Balkema, Rotterdam, pp 335-342.
- Chacón, J., Irigaray, C., El Hamdouni, R., Fernández, T. (1996a). Consideraciones sobre los riesgos derivados de los movimientos del terreno, su variada naturaleza y las dificultades de evaluación. In: Chacón J, Irigaray C (eds) 6th Congreso Nacional y Conferencia Internacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio; Riesgos Naturales, Ordenación del Territorio y Medio Ambiente, Granada, pp407-418.
- Chacón, J. (2005). Mapas de zonas inestables y sistemas de información geográfica (SIG) In: Corominas J, Alonso E, Romana M, Hürlimann M (eds) VI Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, Valencia, vol. 3:1196-1271.
- Chacón, J., Irigaray, C., Fernández, T., El Hamdouni, R. (2006). Engineering geology maps: landslides and geographical information systems. *Bull Eng Geol Environ* 65(4): 341-411. doi: 10.1007/s10064-006-0064-z.
- Chowdhury, R.N. (1976). Initial stresses in natural slope analysis, rock engineering for foundations and slopes. ASCE Geotechnical Engineering Specialty Conference, Boulder, Colorado, pp 404–414.
- Chowdhury, R.N., & Bertoldi, C. (1977). Residual shear tests on soil from two natural slopes. *Australian Geomechanics Journal G*, 7, 1-9.
- Chung, C.J.F., & Fabbri, A.G. (1993). The representation of geoscience information for data integration. *Natural resources research*, 2(2), 122-139.
- Chung, C.F., Fabbri, A.G., Van Westen, C.J. (1995). Multivariate regression analysis for landslide hazard zonation. In: Carrara A, Guzzetti F (eds) Geographical Information System in Assessing Natural Hazards. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp107-134.
- Chung, C.F., Frabbri, A.G. (1999). Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 65 (12):1389-1399.
- Chung, C.F. & Keating, P.B. (2002). Mineral potential evaluation based on airborne geophysical data. *Exploration Geophysics*, 33:28-34.

- Chung, C.F., & Fabbri, A.G. (2005). Systematic procedures of landslide hazard mapping for risk assessment using spatial prediction models. *Landslide hazard and risk*. Wiley, New York, 139-177.
- Chung, C.J. (2006). Using likelihood ratio functions for modeling the conditional probability of occurrence of future landslides for risk assessment. *Computers & Geosciences*, 32(8), 1052-1068.
- Chung, C.J., & Fabbri, A.G. (2008). Predicting landslides for risk analysis—spatial models tested by a cross-validation technique. *Geomorphology*, 94(3), 438-452.
- Clerici, A., Perego, S., Tellini, C., & Vescovi, P. (2002). A procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method. *Geomorphology*, 48(4), 349-364.
- Coe, J. A., Michael, J.A., Crovelli, R.A., Savage, W.Z., Laprade, W. T., & Nashem, W. D. (2004). Probabilistic assessment of precipitation-triggered landslides using historical records of landslide occurrence, Seattle, Washington. *Environmental and Engineering Geoscience*, 10(2), 103-122.
- Cooke, R.U., and Doornkamp, J.C. (1990). *Geomorphology in Environmental Management* (2nd edn). Oxford: Oxford University Press, 410.
- Colangelo, G., Perrone, A. (2012). Geoelectrical tomography as an operative tool for emergency management of landslide: An application in basilicata region, Italy. *Int J Geophys*. doi: 10.1155/2012/593268.
- Coltorti, M., Brogi, A., Fabbrini, L., Firuzabadì, D., Pieranni, L. (2011). The sagging deep-seated gravitational movements on the eastern side of Mt. Amiata (Tuscany, Italy). *Nat Hazards* 59:191–208. doi: 10.1007/s11069-011-9746-3.
- Cooke, R.U., Doornkamp, J.C. (1974). *Geomorphology in Environmental Management: an introduction*. Oxford, Clarendon Press, 411 pp.
- Cooper, A. (2008). The classification, recording, databasing and use of information about building damage caused by subsidence and landslides. *Q J Eng Geol Hydrogeol* 41:409–424. doi: 10.1144/1470-9236/07-223.
- Corominas, J. (1987). Criterios para la confección de mapas de peligrosidad de movimientos de ladera. *Riesgos Geológicos, serie medioambiental, curso de Riesgos Geológicos, IGME*. Madrid, pp. 193-201.

- Corominas, J. (1992). Landslide risk assessment and zoning. *Planning the Use of the Earth's Surface*, 141-173.
- Corominas, J., Copons, R., Vilaplana, J. M., Altimir, J., & Amigó, J. (2003). Integrated landslide susceptibility analysis and hazard assessment in the principality of Andorra. *Natural Hazards*, 30(3), 421-435.
- Corominas, J., Moya, J. (2008). A review of assessing landslide frequency for hazard zoning purposes. *Engineering Geology* 102:193-213.
- Costanzo, D., Rotigliano, E., Irigaray, C., Jiménez-Perálvarez, J.D., Chacón, J. (2012). Factors selection in landslide susceptibility modelling on large scale following the GIS Matrix Method: application to the river Beiro basin (Spain) *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 12(2):327-340. doi:10.5194/nhess-12-327-2012
- Cross, M. (1998). Landslide susceptibility mapping using the matrix assessment approach: a Derbyshire case study. *Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications*, 15(1), 247-261.
- Crozier, M.J., Eyles, R.J. (1980). Assessing the probability of rapid mass movement. In *Proceedings of 3rd Australia-New Zealand Conference on Geomechanics*, Wellington, N.Z.: Institution of Professional Engineers New Zealand, 1980: 2-47-2-51. *Proceedings of Technical Groups*. Vol. 6, p. 247-251.
- Crozier, M.J. (1984). Field assessment of slope instability. In: Brunsden D, Prior DB, editors. *Slope Instability* New York: Wiley, pp. 103–142.
- Crozier, M.J. (1986). *Landslides: causes, consequences and environment*. Croom Helm Publishers, Surrey Hills, London, p. 272.
- Cruden, D.M. (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 43(1), 27-29.
- Cruden, D.M., Varnes, D.J. (1996). Landslide types and processes. In: Turner AK, Schuster RL (Eds) *Landslides: investigation and mitigation*. Sp. Rep. 247, Transportation Research Board, National Research Council. National Academy Press, Washington DC, pp. 36–75.
- Cunnane, C. (1973). A particular comparison of annual maxima and partial duration series methods of flood frequency prediction. *J Hydrol* 18(3–4):257–271. doi:10.1016/0022-1694(73)90051-6.

- Cueva Romero, G.C., (2015). *Mapa de unidades geomorfológicas de la cuenca de Loja*. Tesis de pregrado, Universidad Técnica Particular de Loja. Loja, Ecuador.
- Dai, F.C., & Lee, C.F. (2002). Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, 42(3), 213-228.
- Davis, J.C., Chung, C., Ohlmacher, G. (2006). Two models for evaluating landslide hazards. *Comput Geosci* 32:1120-1127. doi:10.1016/j.cageo.2006.02.006.
- DeGraff, J.V., & Romesburg, C. (1980). Regional landslide susceptibility assessment for wildland management: a matrix approach.
- Demoraes, F., D'Ercole Robert (2001). Cartografía de riesgos y capacidades en el ecuador. COOPI, OXFAM y SIISE.
- De Bari, C., Lapenna, V., Perrone, A., Puglisi, C., Sdao, F. (2011). Digital photogrammetric analysis and electrical resistivity tomography for investigating the Picerno landslide (Basilicata region, southern Italy). *Geomorphology* 133, 34–46.
- De Vita, P., Napolitano, E., Godt, J., Baum, R. (2013). Deterministic estimation of hydrological thresholds for shallow landslide initiation and slope stability models: case study from the Somma-Vesuvius area of southern Italy. *Landslides* 10(6):713–728. doi:10.1007/s10346-012-0348-2.
- Dewitte, O., Chung, C.J., Cornet, Y., Daoudi, M., & Demoulin, A. (2010). Combining spatial data in landslide reactivation susceptibility mapping: a likelihood ratio-based approach in W Belgium. *Geomorphology*, 122(1), 153-166.
- Dikau, R., Cavallin, A., Jaeger, S. (1996). Databases and GIS for landslide research in Europe. *Geomorphology* 15(3):227–239.
- Dikau, R., & Schrott, L. (1999). The temporal stability and activity of landslides in Europe with respect to climatic change (TESLEC): main objectives and results. *Geomorphology*, 30(1), 1-12.
- Dogan, U., Oz, D., Ergintav, S. (2013). Kinematics of landslide estimated by repeated GPS measurements in the Avcilar region of Istanbul, Turkey. *Stud Geophys Geod* 57:217–232. doi: 10.1007/s11200-012-1147-x.

- Egred, J. (2009). Catálogo de terremotos del Ecuador 1541–2009, Escuela Politécnica Nacional, Instituto Geofísico, *Internal Report*.
- Einstein, H.H. (1988). Special lecture: landslide risk assessment procedure. Proceedings 5th International Symposium on Landslides, Lausanne 2, 1075–1090.
- Einstein, H.H. (1997). Landslide risk — systematic approaches to assessment and management. In: Cruden, D.M., Fell, R. (Eds.), *Landslide Risk Assessment. Proc. Inter. Workshop on Landslide Risk Assessment*, Honolulu, 19–21 February 1997 Balkema, Rotterdam, pp. 25–50.
- Eras, M. (2014). Determinación de zonas susceptibles a movimientos en masa en el Ecuador, a escala 1:1.000.000 utilizando el método de ponderación de parámetros. Tesis de pregrado. Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador, p. 119.
- Erginal, A.E., Öztürk, B., Ekinci, Y.L., Demirci, A. (2009). Investigation of the nature of slip surface using geochemical analyses and 2-D electrical resistivity tomography: a case study from Lapseki area, NW Turkey. *Environmental geology* 58(6):1167.
- Ermini, L., Catani, F., & Casagli, N. (2005). Artificial neural networks applied to landslide susceptibility assessment. *Geomorphology*, 66(1), 327-343.
- ESRI (1995). Arc/Info 7.1 Environmental Systems Research Institute, Redlands, Calif.
- Evans, N.C., Huang, S.W., King, J.P. (1997). The natural terrain landslide study phases I and II. Special Project Report, SPR 5/97. Planning Division, Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering Department, Hong Kong, 119 pp.
- Evans, N.C., King, J.P. (1998). The natural terrain landslide study: debris avalanche susceptibility. Technical Note TN 1/98. Planning Division, Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering Department, Hong Kong, 96 pp.
- Fabbri, A., Chung, C-J., Cendrero, A., Remondo, J. (2003). Is prediction of future landslides possible with a GIS?. *Natural Hazards* 30 (3), 487-499.
- Feizizadeh, B., & Blaschke, T. (2013). GIS-multicriteria decision analysis for landslide susceptibility mapping: comparing three methods for the Urmia lake basin, Iran. *Natural hazards*, 65(3), 2105-2128.

- Feizizadeh, B., Blaschke, T., & Roodposhti, M. S. (2013). Integrating GIS Based Fuzzy Set Theory in Multicriteria Evaluation Methods for Landslide Susceptibility Mapping. *International Journal of Geoinformatics*, 9(3).
- Felicísimo, A.M. (1994). Modelos digitales del terreno: principios y aplicaciones en las ciencias ambientales. Ed Pentalfa. ISBN: 84-7848-475-2.
- Fell, R., Ho, K.K., Lacasse, S., & Leroi, E. (2005). A framework for landslide risk assessment and management. *Landslide risk management*, 3-25.
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., Savage, W.Z. (2008a). On behalf of the JTC-1 Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for landuse planning. *Engineering Geology* 102(3-4):85-98. doi:10.1016/j.enggeo.2008.03.022.
- Fenti, V., Silvano, S., & Spagna, V. (1979). Methodological proposal for an engineering geomorphological map. Forecasting rockfalls in the Alps. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 19(1), 134-138.
- Fernández, T., El Hamdouni, R., Irigaray, C., and Chacón, J. (2000). Metodología para la elaboración de cartografía de susceptibilidad a los movimientos de ladera, Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía, ed., *VII Congreso Nacional de Topografía y Cartografía*, TOP-CART 2000, Madrid, Spain, pp. 610–620.
- Fernández, T. (2001). Cartografía, análisis y modelado de la susceptibilidad a los movimientos de ladera en macizos rocosos mediante SIG: Aplicación a diversos sectores del sur de la provincia de Granada. Unpublished PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Granada, Spain, p.648.
- Fiorucci, F., Cardinali, M., Carlà, R., Rossi, M., Mondini, A.C., Santurri, L., Ardizzone, F., Guzzetti, F. (2011). Seasonal landslides mapping and estimation of landslide mobilization rates using aerial and satellite images. *Geomorphology*, 129, 59-70.
- Flageollet, J.C., Maquaire, O., & Weber, D. (1996). Geotechnical investigations into the Super Sauze landslide. Geomorphological and hydrogeological results. In *Workshop: "Landslides and Flash flood"*, Centre Européen sur les Risques Géomorphologiques, Barcelonnette–Vaison la Romaine du (pp. 30-9).

- Frattini, P., Crosta, G.B., Fusi, N., & Dal Negro, P. (2004). Shallow landslides in pyroclastic soils: a distributed modelling approach for hazard assessment. *Engineering Geology*, 73(3), 277-295.
- Galli, M., Ardizzone, F., Cardinali, M., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (2008). Comparing landslide inventory maps. *Geomorphology*, 94(3), 268-289.
- Gao, J. (1993). Identification of topographic settings conducive to landsliding from DEM in Nelson County, Virginia, USA. *Earth surface processes and landforms*, 18(7), 579-591.
- Gillot, E.J. (1986). Some clay-related problems in engineering geology in North America. *Clay Minerals*. 21:261–278.
- Glade, T., Crozier, M., Smith, P. (2000). Applying probability determination to refine landslide-triggering rainfall thresholds using an empirical “Antecedent Daily Rainfall Model”. *Pure appl Geophys* 157(6–8):1059–1079. doi:10.1007/s000240050017.
- Gokceoglu, C., Aksoy, H. (1996). Landslide susceptibility mapping of the slopes in the residual soils of the Mengen region (Turkey) by deterministic stability analyses and image processing techniques. *Engineering Geology* 44, 147– 161.
- González de Vallejo, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L., y Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Prentice Hall. Madrid, 750 p.
- González-Díez, A. (1995). Cartografía de movimientos de ladera y su aplicación al desarrollo temporal de los mismos y de la evolución del paisaje. Ph.D. Thesis. Univ. of Oviedo.
- González, A., Díaz de Terán, J.R., Barba, F.J., Remondo, J., & Cendrero, A. (1996). Propuesta de un modelo cronológico para las terrazas de los ríos de la vertiente cantábrica.
- González-Díez, A., Salas, L., Díaz de Terán, J.R., Cendrero, A. (1996a). Late Quaternary climate changes and mass movement frequency and magnitude in the Cantabrian region, Spain. *Geomorphology* 15:291–309.
- González-Díez, A., Remondo, J., de Terán, J.R.D., & Cendrero, A. (1999). A methodological approach for the analysis of the temporal occurrence and triggering factors of landslides. *Geomorphology*, 30(1), 95-113.

- González García, A.J., Mayorga Marquez, R. (2004). Thresholds for rainfall events that induce landslides in Colombia. *Landslides: Evaluation and Stabilization*, Taylor and Francis Group, London, pp. 349-355.
- Gorsevski, P.V., Gessler, P.E., Boll, J., Elliot, W.J., & Foltz, R.B. (2006). Spatially and temporally distributed modeling of landslide susceptibility. *Geomorphology*, 80(3), 178-198.
- Gökceoglu, C., & Aksoy, H. (1996). Landslide susceptibility mapping of the slopes in the residual soils of the Mengen region (Turkey) by deterministic stability analyses and image processing techniques. *Engineering Geology*, 44(1-4), 147-161.
- Grana, V., Tommasi, P. (2014). A deep-seated slow movement controlled by structural setting in marly formations of Central Italy. *Landslides* 11:195–212. doi: 10.1007/s10346-013-0384-6.
- Grove, J.M. (1972). The incidence of landslides, avalanches and floods in Western Norway during the Little Ice Age. *Artic and Alpine Research*, 4,131-138.
- Gruber, S., & Peckham, S. (2009). Land-surface parameters and objects in hydrology. *Developments in Soil Science*, 33, 171-194.
- Guamán, G. (2008). “Mapa de riesgos geológicos de Loja”, G. (Consultoría del Municipio de Loja).
- Guamán, G. (2012). *Aplicación de SIG para el Manejo de Riesgos Naturales en el Área Urbano de la Ciudad de Loja*. Tesis de Postgrado. 101 pp. Universidad San Francisco de Quito, Ecuador. Disponible en <http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/1997/1/104402.pdf>.
- Guzzetti, F., Cardinali, M., & Reichenbach, P. (1996). The influence of structural setting and lithology on landslide type and pattern. *Environmental & Engineering Geoscience*, 2(4), 531-555.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology* 31(1–4):181–216. doi:10.1016/S0169-555X(99)00078-1.
- Guzzetti, F. (2002). Landslide hazard assessment and risk evaluation: overview, limits and prospective. *Proceedings 3rd MITCH Workshop Floods, Droughts and Landslides*, pp. 24-26.

- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., & Ardizzone, F. (2005). Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology*, 72(1), 272-299.
- Guzzetti, F., Galli, M., Reichenbach, P., Ardizzone, F., & Cardinali, M. (2006). Landslide hazard assessment in the Collazzone area, Umbria, Central Italy. *Natural Hazards and Earth System Science*, 6(1), 115-131.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., Stark, C.P. (2007). Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteorol Atmos Phys* 98(3-4):239-267. doi:10.1007/s00703-007-0262-7.
- Guzzetti, F., Mondini, A.C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., Chang, K.-T. (2012). Landslide inventory maps: new tools for an old problem. *Earth Sci. Rev.* 112, 42-66.
- Hammond, C.J., Prellwitz, R.W., Miller, S.M. (1992). Landslides hazard assessment using Monte Carlo simulation. In: Bell DH (ed) Proceedings of 6th international symposium on landslides, Christchurch, New Zealand, Balkema, 2, pp. 251-294.
- Hansen, M.J. (1984). Strategies for classification of landslides. *Slope instability*, 1-25.
- Haque, C.E., & Burton, I. (2005). Adaptation options strategies for hazards and vulnerability mitigation: an international perspective. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 10(3), 335-353.
- Hartlen, J., Viberg, L. (1988). General report: evaluation of landslide hazard. In: Proceedings of the Vth ISL, Lausanne, vol 2, pp. 1037-1057.
- Hermanns, R.L. Valderrama, P., Fauqué, L., Penna, I.M., Sepúlveda, S., Moreiras, S., Zavala Carrión, B. (2012). Landslides in the Andes and the need to communicate on an interandean level on landslide mapping and research. *Rev Asoc Geol Argent* 69(3):321-327.
- Horlick-Jones, T., Amendola, A., & Casale, R. (Eds.). (1995). *Natural risk and civil protection* (Vol. 16050). CRC Press.
- Hungerbühler, D., Steinmann, M., Winkler, W., Sowards, D., Egüez, A., Peterson, D.E., Helg, U., Hammer, C. (2002). Neogene stratigraphy and Andean geodynamics of southern Ecuador. *Earth-Science Rev* 57:75-124. doi: 10.1016/S0012-8252(01)00071-X.

- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167-194.
- Hurrell, J.W. (1995). Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation. *Science*, 269(5224):676-679.
- Hutchinson, J.N. (1968). MASS MOVEMENT Mass movement. In *Geomorphology* (pp. 688-696). Springer Berlin Heidelberg.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2010). *Objetivos, servicios y publicaciones del IGAC*. IGAC.
- INEC (2010). Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. VII Censo de población y VI de vivienda. Ecuador. URL: <http://www.inec.gob.ec>
- Ibadango, C., Soto, J., Tamay, J., Escudero, P., Porter, M. (2005). Mass movements in the Loja Basin- Ecuador, South America. *Proceedings, Int Conf Landslide Risk Management*. Vancouver, Canada. 10:1 – 7.
- Ibsen, M.L., Brunnsden, D. (1996). The nature, use and problems of historical archives for the temporal occurrence of landslides, with specific reference to the south coast of Britain, Ventnor. Isle of Wight. *Geomorphology* 15(3–4):241–258. doi:10.1016/0169-555X(95)00073-E.
- IDNHR, Advisory Committee (1987). *Confronting Natural Disasters. An International Decade for Natural Hazard Reduction*. National Academy Press, WA, 60 pp.
- INEC (2010). Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. VII Censo de población y VI de vivienda. Ecuador. URL: <http://www.inec.gob.ec>
- Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero y Metalúrgico (INIGEMM) (2013). Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa del Ecuador, escala 1:1'000,000. Technical report. Unpublished.
- Irigaray, C. (1995). *Movimientos de Ladera: Inventario, Análisis y Cartografía de la Susceptibilidad Mediante un Sistema de Información Geográfica. Aplicación a las Zonas de Colmenar (Málaga), Rute (Córdoba) y Montefrío (Granada)*. Unpublished PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Granada, Spain, p. 578.
- Irigaray, C., Lamas, F., El Hamdouni, R., Fernández, T., Chacón, J. (2000). The importance of the precipitation and the susceptibility of the slopes for the

triggering of landslides along the roads. *Nat Hazards* 21(1):65-81. doi:10.1023/A:1008126113789.

Irigaray, C., & Chacón, J. (2002). Métodos de análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante SIG. *Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera con la técnica SIG. Fundamentos y aplicaciones en España*, 21-36.

Irigaray, C., Fernández, T., Chacón, J. (2003). Preliminary rock-slope-susceptibility assessment using GIS and the SMR classification. *Nat Hazards* 30:309-324.

Irigaray, C., Fernández, T., El Hamdouni, R., Chacón, J. (2007). Evaluation and validation of landslide-susceptibility maps obtained by a GIS matrix method: examples from the Betic Cordillera (southern Spain). *Nat Hazards* 41(1):61-79. doi:10.1007/s11069-006-9027-8.

Irigaray, C., Palenzuela, J.A. (2013). Análisis de la actividad de movimientos de ladera mediante láser escáner terrestre en el suroeste de la Cordillera Bética (España) Landslide activity analysis using terrestrial laser scanning at southwest of the Betic Cordillera (Spain). *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente* 31:53–67.

Iovine, G., Di Gregorio, S., Lupiano, V. (2003a). Assessing debris-flow susceptibility through cellular automata modelling: an example from the May 1998 disaster at Pizzo d'Alvano (Campania, southern Italy). In: Rickenmann D, Chen CL (eds.) *Debris-flow hazards mitigation: mechanics, prediction and assessment*. Proceedings of 3rd DFHM international conference, Davos, Switzerland, September 2003, vol 1. Millpress Science Publishers, Rotterdam, pp. 623-634.

Iovine, G., Di Gregorio, S., Lupiano, V. (2003b). Debris-flow susceptibility assessment through cellular automata modeling: an example from 15-16 December 1999 disaster at..

Ives, J.D., & Messerli, B. (1981). Mountain Hazards Mapping in Nepal Introduction to an Applied Mountain Research Project. *Mountain Research and Development*, 223-230.

Jara, J. (2012). Caracterización Geológico-Geotécnica de los movimientos de ladera de los sectores La Florida y Chontacruz con aplicación de Tomografía Eléctrica y Técnicas GPS Diferencial. Trabajo de fin de titulación. Universidad Técnica Particular de Loja.

- Jiang, J.W., Xiang, W., Rohn, J., Zeng, W., Schleier, M. (2015). Research on water–rock (soil) interaction by dynamic tracing method for Huangtupo landslide, Three Gorges Reservoir, PR China. *Environmental Earth Sciences* 74(1):557-571.
- Jiang, H., Muscheler, R., Björck, S., Seidenkrantz, M.S., Olsen, J., Sha, L., ... & Knudsen, M.F. (2015). Solar forcing of Holocene summer sea-surface temperatures in the northern North Atlantic. *Geology*, 43(3), 203-206.
- Jenkins, G.M., Watts, D.G. (1968). *Spectral analysis and its applications*. Holden-Day, San Francisco, p. 525.
- Jiménez-Perálvarez, J.D., Irigaray, C., El Hamdouni, R., & Chacón, J. (2009). Building models for automatic landslide-susceptibility analysis, mapping and validation in ArcGIS. *Natural hazards*, 50(3), 571-590.
- Jiménez-Perálvarez, J.D., Irigaray, C., El Hamdouni, R., Chacón, J. (2011). Landslide-susceptibility mapping in a semi-arid mountain environment: an example from the southern slopes of Sierra Nevada (Granada, Spain). *Bull Eng Geol Environ* 70:265–277.
- Jiménez-Perálvarez, J.D. (2012). *Movimientos de ladera en la vertiente meridional de sierra nevada (Granada, España): identificación, análisis y cartografía de susceptibilidad y peligrosidad mediante SIG*. Unpublished PhD Thesis. Department of Civil Engineering. University of Granada, Spain, p 210. ISBN: 9788490282892.
- Karagiannidis, A.F., Karacostas, T., Maheras, P., Makrogiannis, T. (2012). Climatological aspects of extreme precipitation in Europe, related to mid-latitude cyclonic systems. *Theoretical and Applied Climatology*, 107(1-2):165-174.
- Knippertz, P. (2003). Tropical-extratropical interactions causing precipitation in Northwest Africa: statistical analysis and seasonal variations. *Monthly weather review*, 131(12):3069-3076.
- Kashiwaya, K., Okimura, T., & Kawatani, T. (1986). Dendrochronological information and hydrological conditions for landslides in Mt. Futatabi-san area of Rokko mountains. *Trans Jpn Geomorphol Union*, 7, 281-290.
- Kennerley, J.B., Almeida, L. (1975b). *Geological Map of Ecuador, Loja Sheet (56), Scale 1: 100,000*. Military Geographical Institute (IGM), Ministry of Natural Resources and Energy (MRNE), Directorate General of Geology and Mines (DGGM), London Institute of Geological Sciences (IGS).

- Kienholz, H. (1978). Geomorphology and natural hazards of Grindewald, Switzerland, scale 1:10,000. *Artic and Alpine Research* 10(2):169-184.
- Kienholz, H., Bichsel, M., Grunder, M., & Mool, P. (1983). Kathmandu-Kakani area, Nepal: mountain hazards and slope stability map. *Mountain hazards mapping project map, 4*. (Escale 1:10.000).
- Kim, S.K., Hong, W.P., Kim, Y.K. (1991). Prediction of rainfall-triggered landslides in Korea. In: Bell C (ed) 6th international symposium on landslides, vol 2. A.A. Balkema, Rotterdam.
- Kotarba, A. (1988). Fósil rock glaciers in the Polish Tatra Mountains: origin and age. In, M. Pécsi & L. Starkel. *Paleogeography of Carpathian Regions*, 161-169.
- Kshirsagar, A.M. (1972). *Multivariate Analysis*: Marcel Dekker Inc, New York, 534 p.
- Labitzke, K., Van Loon, H., Shine, K. (1990). Associations between the 11-Year Solar Cycle, the Quasi-Biennial Oscillation and the Atmosphere: A Summary of Recent Work [and Discussion]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 330(1615):577-589.
- Lacasse, S., Nadim, F. (2009). Landslide risk assessment and mitigation strategy. In: Sassa K, Canuti P (eds.) *Landslides—disaster risk reduction*. Springer, Berlin, Sec. 3, p 31–61. ISBN/ISSN: 978-3-540-69966-8. doi:10.1007/978-3-540-69970-5_3.
- Lamb, H.H. (1977). *Climate history and the future*. Methuen, London, p. 212.
- Lee, S., & Talib, J. A. (2005). Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis. *Environmental Geology*, 47(7), 982-990.
- Larsen, M.C. (2008). Rainfall-triggered landslides, anthropogenic hazards, and mitigation strategies. *Adv Geophys* 14:147-153.
- Lapenna, V., Lorenzo, P., Perrone, A., Piscitelli, S., Rizzo, E., Sdao, F. (2003). High-resolution geoelectrical tomographies in the study of Giarrossa landslide (southern Italy). *Bull Eng Geol Environ* 62:259–268. doi: 10.1007/s10064-002-0184-z.
- Lee, S. (2004). Application of likelihood ratio and logistic regression models to landslide susceptibility mapping in GIS. *Environ Manage* 34(2):223–232.

- Lee, S., & Talib, J. A. (2005). Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis. *Environmental Geology*, 47(7), 982-990.
- Leick, A. (2004). GPS Satellite Surveying. Third edition. John Wiley & Sons. New York, USA.
- Leroi, E. (1996). Landslide hazard-risk maps at different scales: objectives, tools and developments. *Landslides*, 1, 35-51.
- Litherland, M., Aspden, J.A., Jemielita, R.A. (1994). The metamorphic belts of Ecuador, British Geological Survey, Overseas Memoir 11. BGS, Keyworth, p. 147.
- Liu, G.Y., Zhu, Y.Z., Zhou, R.S. (2005). A new approach of single epoch GPS positioning for landslide monitoring. *Acta seismologica sínica*, 18:427–434. doi: 10.1007/s11589-005-0020-1.
- Li, C., Ma, T., Zhu, X., Li, W. (2011). The power-law relationship between landslide occurrence and rainfall level. *Geomorphology* 130(3–4):221–229. doi:10.1016/j.geomorph.2011.03.018.
- Loke, M.H. (2012). Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys. Geotomo Software Company.
- Lozano, P., Bussmann, R.W., Küppers, M. (2005). Landslides as ecosystem disturbance—their implications and importance in South Ecuador. *Lyonia* 8(1):67-72.
- Luque-Espinar, J.A., Chica-Olmo, M., Pardo-Igúzquiza, E., García-Soldado, M.J. (2008). Influence of climatological cycles on hydraulic heads across a Spanish aquifer. *Journal of hydrology*, 354(1):33-52.
- Lumb, P. (1975). Slope failure in Hong Kong. *Q J Eng Geol* 8:31–65.
- Luzi, L. and Fabbri, A. (1995). Application of favourability modelling to zoning of landslide hazard in the Fabriano area, central Italy. *Proceedings Joint Conference and Exhibition on Geographical Information, JEC-GI'95*, La Haya, vol. 1: 398-403.
- Ma, T., Li, C., Lu, Z., Wang, B. (2014). An effective antecedent precipitation model derived from the power-law relationship between landslide occurrence and rainfall level. *Geomorphology* 216:187–192. doi:10.1016/j.geomorph.2014.03.033.

- MacEwan, D.M., Wilson, M.J. (1980). Interlayer and intercalation complexes of clay minerals. *Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification*, 5, 197-248.
- Maharaj, R.J. (1993). Landslide processes and landslide susceptibility analysis from an upland watershed: a case study from St. Andrew, Jamaica, West Indies. *Engineering Geology*, 34(1-2), 53-79.
- Marocco, R., Eguez, A., Lavenu, A., Noblet, C., Baudino, R., Winter, T. (1994). Las cuencas intramontanosas neogenas del Ecuador. Resúmenes de conferencias ORSTOM (Ecuador). Ediciones ORSTOM, Quito, Ecuador, 135-138.
- Matula, M., & Nemčok, A. (1965). Verbreitung und Charakter der Rutschungen in Westkarpaten. In *Proc. of the 7th Congress CBGA, Sofia, Sect (Vol. 5, pp. 103-110)*.
- McBean, G. A., & Henstra, D. (2003). *Climate change, natural hazards and cities*. Institute for Catastrophic Loss Reduction.
- Merritt, A.J., Chambers, J.E., Murphy, W., Wilkinson, P.B., West, L.J., Gunn, D.A., Meldrum, P.I., Kirkham, M., Dixon, N. (2014). 3D ground model development for an active landslide in Lias mudrocks using geophysical, remote sensing and geotechnical methods. *Landslides*, 11(4), 537-550.
- Mora, C., S.E.R.G.I.O., & Vahrson, W. G. (1994). Macrozonation methodology for landslide hazard determination. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 31(1), 49-58.
- Moore, I.D., Grayson, R.B., Ladson, A.R. (1991). Digital terrain modeling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications. *Hydrolog Process* 5:3–30.
- Moore, D.M., Reynolds, R.C. (1997). X-Ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals, 2nd. (Vol. 378). Oxford: Oxford university press.
- Muenchow, J., Brenning, A., Richter, M. (2012). Geomorphic process rates of landslides along a humidity gradient in the tropical Andes. *Geomorphology*, 139:271-284.
- Mulder, H.F.H.M., & Van Asch, T. W. (1988). On the nature and magnitude of variance of important geotechnical parameters. In *Proceedings of the Vth International Symposium on Landslides, Lausanne (Vol. 1, pp. 239-243)*.

- Mulder, H.F.H.M. (1991). *Assessment of landslide hazard*, Nederlandse Geografische Studies, 124, University of Utrecht. 150 pp.
- Murck, B.W., Skinner, B.J., Porter, S.C., (1997). *Dangerous Earth. An Introduction to Geological Hazards*. Wiley, New York, 300 pp.
- Nandi, A., & Shakoor, A. (2010). A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses. *Engineering Geology*, 110(1), 11-20.
- Newman, E.B., Paradis, A.R., and Brabb, E.E., (1978). *Feasibility and cost of using a computer to prepare landslide susceptibility maps of the San Francisco Bay region, California*. U.S. Geological Survey Bulletin 1443, 27 pp.
- Nikolopoulos, E. I., Crema, S., Marchi, L., Marra, F., Guzzetti, F., & Borga, M. (2014). Impact of uncertainty in rainfall estimation on the identification of rainfall thresholds for debris flow occurrence. *Geomorphology*, 221, 286-297.
- Nilsen, T.H., Wright, R.H., Vlastic, T.C. and Spangle, W.E. (1979). Relative slope stability and land-use planning in the San Francisco Bay Region, California, US, Geological Survey Professional Paper 994, 96 pp.
- Noferini, L., Pieraccini, M., Mecatti, D., Macaluso, G., Atzeni, C., Mantovani, M., Marcato, G., Pasuto, A., Silvano, S., Tagliavini, F. (2007). Using GB-SAR technique to monitor slow moving landslide. *Eng Geol* 95:88–98. doi: 10.1016/j.enggeo.2007.09.002.
- Oh, H.J., & Lee, S. (2011). Landslide susceptibility mapping on Panaon Island, Philippines using a geographic information system. *Environmental Earth Sciences*, 62(5), 935-951.
- Oh, H.J., & Pradhan, B. (2011). Application of a neuro-fuzzy model to landslide-susceptibility mapping for shallow landslides in a tropical hilly area. *Computers & Geosciences*, 37(9), 1264-1276.
- O'Hare, G.R.E.G., & Rivas, S. (2005). The landslide hazard and human vulnerability in La Paz City, Bolivia. *The Geographical Journal*, 171(3), 239-258.
- Oyagi, N. (1984). Landslide in the weathered rocks and residual soil in Japan and surrounding area: a state-of-the art report. In *Proc. 4th Intern. Symposium on landslide* (Vol. 3, pp. 1-31).

- Özer, E., & Mentese, E. (2007). Deformation network analysis. Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey.
- Pack, R.T., Tarboton, D.G., & Goodwin, C.N. (1998, September). The SINMAP approach to terrain stability mapping. In *8th congress of the international association of engineering geology, Vancouver, British Columbia, Canada* (Vol. 21, p. 25).
- Palenzuela, J.A., Marsella, M., Nardinocchi, C., Pérez, J. L., Fernández, T., Chacón, J., & Irigaray, C. (2015). Landslide detection and inventory by integrating LiDAR data in a GIS environment. *Landslides*, 12(6), 1035-1050.
- Palenzuela, J.A., Jiménez-Perálvarez, J.D., El Hamdouni, R., Alameda-Hernández, P., Chacón, J., Irigaray, C. (2015). Integration of LiDAR data for the assessment of activity in diachronic landslides: a case study in the Betic Cordillera (Spain). *Landslides*. doi: 10.1007/s10346-015-0598-x.
- Palenzuela, J.A., Jiménez-Perálvarez, J.D., Chacón, J., & Irigaray, C. (2016). Assessing critical rainfall thresholds for landslide triggering by generating additional information from a reduced database: an approach with examples from the Betic Cordillera (Spain). *Natural Hazards*, 84(1), 185-212.
- Panizza, M. (1996). 3 Geomorphological hazard. In: Mario P (eds) *Developments in earth surface processes*. Elsevier, vol 4, pp 75-76. ISBN/ISSN: 0928-2025. doi:[https://doi.org/10.1016/S0928-2025\(96\)80020-4](https://doi.org/10.1016/S0928-2025(96)80020-4).
- Papa, M.N., Medina, V., Ciervo, F., Bateman, A. (2013). Derivation of critical rainfall thresholds for shallow landslides as a tool for debris flow early warning systems. *Hydrol Earth Syst Sci* 17(10):4095–4107. doi:10.5194/hess-17-4095-2013
- Pardo-Igúzquiza, E., Rodríguez-Tovar, F.J. (2012). Spectral and cross-spectral analysis of uneven time series with the smoothed Lomb–Scargle periodogram and Monte Carlo evaluation of statistical significance. *Computers & Geosciences*, 49:207-216.
- Perrone, A., Lapenna, V., Piscitelli, S. (2014). Electrical resistivity tomography technique for landslide investigation: A review. *Earth-Science Rev* 135:65–82. doi: 10.1016/j.earscirev.2014.04.002.

- Petley, D., Dunning, S.A., Rosser, N.J. (2005). The analysis of global landslide risk through the creation of a database of worldwide landslide fatalities. *Landslide risk management*. Balkema, Amsterdam, pp. 367-374.
- Petley, D. (2012). Global patterns of loss of life from landslides. *Geology* 40:927–930. doi: 10.1130/G33217.1
- Poli, S., & Sterlacchini, S. (2007). Landslide representation strategies in susceptibility studies using weights-of-evidence modeling technique. *Natural Resources Research*, 16(2), 121-134.
- Pourghasemi, H.R., Pradhan, B., & Gokceoglu, C. (2012). Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. *Natural hazards*, 63(2), 965-996.
- Pradhan, B., Sezer, E.A., Gokceoglu, C., & Buchroithner, M.F. (2010). Landslide susceptibility mapping by neuro-fuzzy approach in a landslide-prone area (Cameron Highlands, Malaysia). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(12), 4164-4177.
- Pradhan, B., Chaudhari, A., Adinarayana, J., & Buchroithner, M.F. (2012). Soil erosion assessment and its correlation with landslide events using remote sensing data and GIS: a case study at Penang Island, Malaysia. *Environmental monitoring and assessment*, 184(2), 715.
- Press, S.J. (1972). Estimation in univariate and multivariate stable distributions. *Journal of the American Statistical Association*, 67(340), 842-846.
- Proyecto Multinacional Andino (PMA): Geociencias para las Comunidades Andinas (2007). Movimientos en masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional, No. 4, 432 p., 1 cd-rom.
- Putzer, H. (1968). Tertiäre Lignite im interandinen Graben von Ecuador als Beispiel für synorogene Kohlenbildung in intermontanen Becken. *Geologisches Jahrbuch Hannover* 85, 461–488.
- Radbruch-Hall, D.H., Kathleen, E., & Batson, R.M. (1979). Experimental engineering geologic maps of the conterminous United States prepared using computer techniques. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 19(1), 358-363.

- Regmi, N.R., Giardino, J.R., & Vitek, J.D. (2010). Assessing susceptibility to landslides: using models to understand observed changes in slopes. *Geomorphology*, 122(1), 25-38.
- Regmi, N.R., Giardino, J.R., & Vitek, J.D. (2010). Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach: Western Colorado, USA. *Geomorphology*, 115(1), 172-187.
- Regmi, A.D., Yoshida, K., Dhital, M.R., & Devkota, K. (2013). Effect of rock weathering, clay mineralogy, and geological structures in the formation of large landslide, a case study from Dumre Besei landslide, Lesser Himalaya Nepal. *Landslides*, 10(1), 1-13.
- Regmi, N.R., Giardino, J.R., McDonald, E.V., & Vitek, J.D. (2014). A comparison of logistic regression-based models of susceptibility to landslides in western Colorado, USA. *Landslides*, 11(2), 247-262.
- Remondo, J. (2001). Elaboración y validación de mapas de susceptibilidad de deslizamientos mediante técnicas de análisis espacial, Ph.D. thesis, Universidad de Oviedo, Spain.
- Remondo, J., González, A., De Terán, J.R.D., Cendrero, A., Fabbri, A., & Chung, C.J.F. (2003). Validation of landslide susceptibility maps; examples and applications from a case study in Northern Spain. *Natural Hazards*, 30(3), 437-449. doi:10.1023/B:NHAZ.0000007201.80743.fc.
- Remondo, J., González-Díez, A., De Terán, J.R.D., & Cendrero, A. (2003). Landslide susceptibility models utilising spatial data analysis techniques. A case study from the lower Deba Valley, Guipúzcoa (Spain). *Natural Hazards*, 30(3), 267-279.
- Remondo, J., Bonachea, J., Cendrero, A. (2004). Probabilistic landslide hazard and risk mapping on the basis of occurrence and damages in the recent past. En: Lacerda, W., Ehrlich, M., Fontoura, S., Sayão, A. (Eds.), *Landslides: Evaluation and Stabilization*, vol. 1, pp. 125-130.
- Remondo, J., Bonachea, J., & Cendrero, A. (2005). A statistical approach to landslide risk modelling at basin scale: from landslide susceptibility to quantitative risk assessment. *Landslides*, 2(4), 321-328.
- Rizzo, V. (2002). GPS monitoring and new data on slope movements in the Maratea Valley (Potenza, Basilicata). *Phys Chem Earth* 27:1535–1544. doi: 10.1016/S1474-7065(02)00174-2.

- Roa Lobo, J., & Kamp, U. (2012). Uso del índice topográfico de humedad (ith) para el diagnóstico de la amenaza por desborde fluvial, Trujillo-Venezuela. *Revista geográfica venezolana*, 53(1).
- Rupke, J., Cammeraat, E., Seijmonsbergen, A.C., Van Westen, C.J. (1988). Engineering geomorphology of the Widentobel catchment, Apenzell and Sankt Gallen, Switzerland: a geomorphological inventory system applied to geotechnical appraisal of slope stability. *Eng Geol* 26:33–68.
- Sassa, K. (2004). The international consortium on landslides. *Landslides*, 1(1), 91-94.
- Sassa, K. (2012). ICL strategic plan 2012-2021 to create a safer geo-environment. *Landslides*, 9(2), 155-164.
- Schuster, R.L., & Krizek, R. (1978). Landslides: analysis and control. *Unknown*.
- Sdao, F., Pascale, S., Rutigliano, P. (2005). Geomorphological features and monitoring of a large and complex landslide near Avigliano urban area (South Italy). *Adv Geosci* 2:97–101. doi: 10.5194/adgeo-2-97-2005.
- SENPLADES (2010). Instructivo Metodológico para la Formulación de Planes Operativos Anuales Institucionales.
- SENPLADES (2016). Resultados de la evaluación del sismo del 16 de abril. Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo. Recuperado de https://issuu.com/publisenplades/docs/resultados_de_la_evaluacion_del_sismo.
- Sezer, E.A., Pradhan, B., & Gokceoglu, C. (2011). Manifestation of an adaptive neuro-fuzzy model on landslide susceptibility mapping: Klang valley, Malaysia. *Expert Systems with Applications*, 38(7), 8208-8219.
- Shuzui, H. (2001). Process of slip-surface development and formation of slip-surface clay in landslides in Tertiary volcanic rocks, Japan. *Engineering Geology* 61(4):199-220.
- SIGTIERRAS (2010). Ortofotografía Escala 1:5000 Generada a Partir de la Toma de Fotografía Aérea.
- Smith, T.C. (1988). A method for mapping relative susceptibility to debris flows with an example from San Mateo County. Landslides, floods, and marine effects of the storm of January 3–5, 1982, in the San Francisco Bay Region, California. *US Geological Survey Professional Paper*, 1434.

- SNGR/ECHO/UNISDR (2012). Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos. Ecuador: Referencias Básicas para la Gestión de Riesgos. Quito, Ecuador.
- Soeters, R., & van Westen, C.J. (1996). Landslides: Investigation and mitigation. Chapter 8-Slope instability recognition, analysis, and zonation. *Transportation research board special report*, (247).
- Soto, J. (2010). Análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante el método de la matriz en un GIS: aplicación a la cuenca de Loja en el sur del Ecuador. Trabajo de fin de máster. Universidad de Granada-España.
- Spiker, E.C., Gori, P.L. (2003a). Partnerships for reducing landslide risk: assessment of the national landslide hazards mitigation strategy. The National Academy of Sciences Press, Washington, DC.
- Spiker, E.C., Gori, P.L. (2003b). National landslide hazards mitigation strategy: a framework for loss reduction. USGS Circular 1244. US Department of Interior, U.S.G.S. Reston, Virginia, 56 pp
- Spiker, E.C., Gori, P.L. (2000). National landslide hazards mitigation strategy: a framework for loss reduction. Open-file report 00-450, Department of Interior, U.S.G.S., USA, 49 pp.
- Stakenborg, J.H. (1986). Digitizing alpine morphology: a digital terrain model based on a geomorphologic map for computer-assisted applied mapping. *ITC journal*, (4), 299-306.
- Starosolszky, O., Melder, O.M., (1989). Hydrology of disasters. World Meteorological Organisation Technical conference, Geneva, November 1988. James and James, London, 319 pp.
- Starkel, L. (1966). Post-glacial climate and the moulding of European relief. In *Proceedings of the International Symposium on World Climate* (Vol. 8000, pp. 15-32).
- Sterlacchini, S., Ballabio, C., Blahut, J., Masetti, M., & Sorichetta, A. (2011). Spatial agreement of predicted patterns in landslide susceptibility maps. *Geomorphology*, 125(1), 51-61.
- Stevenson, P.C. (1997). An empirical method for the evaluation of relative landslide risk. *Bull Int Assoc Eng Geol* 16:69-72 Stokes MA, Smiley TL (1968) An Introduction to Tree-Ring Dating. University of Chicago Press, Chicago.

- Strauhal, T., Loew, S., Holzmann, M., & Zangerl, C. (2016). Detailed hydrogeological analysis of a deep-seated rockslide at the Gepatsch reservoir (Klasgarten, Austria). *Hydrogeology Journal*, 24(2), 349-371.
- Stuiver, M., Braziunas, T.F. (1989). Atmospheric ¹⁴C and century-scale solar oscillations.
- Tagliavini, F., Mantovani, M., Marcato, G., Pasuto, A., Silvano, S. (2007). Validation of landslide hazard assessment by means of GPS monitoring technique – a case study in the Dolomites (Eastern Alps, Italy). *Nat Hazards Earth Syst Sci* 7:185–193. doi: 10.5194/nhess-7-185-2007.
- Tamay, J., & Galindo, J. (2015). Estructura de las cuencas cuaternarias del sur del Ecuador, gravimetría: implicaciones.
- Tamay, J., Galindo-Zaldívar, J., Ruano, P., Soto, J., Lamas, F., & Azañón, J. M. (2016). New insight on the recent tectonic evolution and uplift of the southern Ecuadorian Andes from gravity and structural analysis of the Neogene-Quaternary intramontane basins. *Journal of South American Earth Sciences*, 70, 340-352.
- Tamés, P., Elosegui, J. M., Salazar, A., Almoguera, J., Albert, J., Solesio, J., Fernández Areces, J. L., and López Vilchez, L. (1986). *Estudio de riesgos naturales del territorio de Guipúzcoa (2ª fase). Términos municipales de Deba, Motrico, Mendaro, Elgoibar y Eibar*, 5 Vols., Diputación Foral Guipúzcoa, Open file report.
- Terlien, M.T.J., van Westen, C.J., Van Asch, Th.W.J. (1995). Deterministic modelling in GIS-based landslide hazard assessment. In: Carrara, A., Guzzetti, F. (Eds.), *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands, pp. 57–77.
- Terlien, M.T.J. (1996). Modelling spatial and temporal variations in rainfall-triggered landslides: the integration of hydrologic models, slope stability models and geographic information systems for the hazard zonation of rainfall-triggered landslides with examples from Manizales (Colombia). International Institute for Aerial Survey and Earth Sciences (ITC).
- Terlien, M.T.J. (1997). Hydrological landslide triggering in ash-covered slopes of Manizales (Colombia). *Geomorphology* 20(1):165-175.

- Terlien, M.T.J. (1998). The determination of statistical and deterministic hydrological landslide-triggering thresholds. *Environ Geol* 35(2–3):124–130. doi:10.1007/s002540050299.
- Terzaghi, K. (1950). Mechanism of landslides, in Paige, S., *Application of Geology to Engineering Practice*, Geological Society of America, New York, pp. 83–123.
- Strauhal, T., Loew, S., Holzmann, M., & Zangerl, C. (2016). Detailed hydrogeological analysis of a deep-seated rockslide at the Gepatsch reservoir (Klasgarten, Austria). *Hydrogeology Journal*, 24(2), 349-371.
- UNESCO (1973–1979). Annual summaries of information on natural disasters, 1971–1975. UNESCO, Paris.
- Van Den Eeckhaut, M., Hervás, J. (2012). State of the art of national landslide databases in Europe and their potential for assessing landslide susceptibility, hazard and risk *Geomorphology* 139/140:545-558. doi:10.1016/j.geomorph.2011.12.006.
- Van Westen, C.J. (1993). Application of geographic information systems to landslide hazard zonation. PhD Dissertation, Technical University Delft, ITC-Publication Number 15, ITC, Enschede, The Netherlands, p. 245.
- Van Westen, C.J. (1994). GIS in landslides hazard zonation: a review with examples from the Andes of Colombia. In: Price MF, Heywood DJ (eds) *Mountain environments and geographic information systems*. Taylor and Francis, London, pp. 135-167.
- Van Westen, C.J., Rengers, N., Terlien, M.T.J., Soeters, R. (1997). Prediction of the occurrence of slope instability phenomena through GISbased hazard zonation. *Int J Earth Sci (Geologische Rundschau)* 86(2):404-414. doi:10.1007/s005310050149.
- Van Westen, C.J. (2000). The modelling of landslide hazards using GIS. *Surv Geophys* 21(2-3):241-255. doi:10.1023/A:1006794127521.
- Van Westen, C.J., Rengers, N., & Soeters, R. (2003). Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment. *Natural Hazards*, 30(3), 399-419.
- Varnes, D.J. (1978). Slope movement types and processes. *Special report*, 176, 11-33.

- Varnes, D.J. (1984). Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. Commission on Landslides of the IAEG, UNESCO, Paris. Natural Hazards Series 3, p. 63...
- Varnes, D.J. (1984). IAEG Commission on Landslides and other Mass-Movements Landslide hazard zonation: a review of principles and practice, UNESCO Press, Paris 63 pp.
- Wang, G.Q. (2012). Kinematics of the Cerca del Cielo, Puerto Rico landslide derived from GPS observations. *Landslides*, 9(1), 117-130.
- Weinzettel, P., Dietrich, S., & Varni, M. (2009). Utilización de tomografía eléctrica con distintas configuraciones y espaciamentos electródicos para la caracterización de la zona no saturada. *Jornadas de Investigación de la zona no saturada del suelo. En: Silva Rojas, O. y Carrera Ramírez, J. ed*, 9, 253-260.
- Wen, B.P., Duzgoren-Aydin, N.S., Aydin, A. (2004). Geochemical characteristics of the slip zones of a landslide in granitic saprolite, Hong Kong: implications for their development and microenvironments. *Environmental Geology* 47(1):140-154.
- Wieczorek, G., Glade, T. (2005). Climatic factors influencing occurrence of debris flows. In: Jakob M and Hungr O (eds.) *Debris-flow hazards and related phenomena*. Springer, Berlin, p. 325–362.
https://doi.org/10.1007/3-540-27129-5_14.
- Wilcke, W., Valladarez, H., Stoyan, R., Yasin, S., Valarezo, C., & Zech, W. (2003). Soil properties on a chronosequence of landslides in montane rain forest, Ecuador. *Catena*, 53(1), 79-95.
- Winckell, A. (1997). *1. Las condiciones del medio natural: los paisajes naturales del Ecuador*.
- Winckell, A., & Le Page, M. (2003). El Niño in the City: Vulnerability assessment in Tijuana during the winter of 1997-98. *Geofísica Internacional*, 42(3), 553-565.
- WP/WLI (1993a). A suggested method for describing the activity of a landslide. International Geotechnical Societies' UNESCO Working Party on World Landslide Inventory; Chairman Cruden DM, *Bull Eng Geol Environ* 47:53-57.


- WP/WLI (1995). A suggested method for describing the rate of movement of a landslide. International Geotechnical Societies' UNESCO Working Party on World Landslide Inventory; Chairman Bonnard CH, Bull Eng Geol Environ 52:75-78.
- Wu, W., & Sidle, R.C. (1995). A distributed slope stability model for steep forested basins. *Water resources research*, 31(8), 2097-2110.
- Xie, M., Esaki, T., & Zhou, G. (2004). GIS-based probabilistic mapping of landslide hazard using a three-dimensional deterministic model. *Natural Hazards*, 33(2), 265-282.
- Yilmaz, I., Karacan, E. (2002). A Landslide in Clayey Soils: An Example from the Kızıldag Region of the Sivas-Erzincan Highway (Sivas-Turkey). *Environmental Geosciences*, 9(1), 35-42.
- Yin, Y., Wang, H., Gao, Y., & Li, X. (2010a). Real-time monitoring and early warning of landslides at relocated Wushan Town, the Three Gorges Reservoir, China. *Landslides*, 7(3), 339-349.
- Zárate, B. (2011). Monitoreo de movimientos de ladera en el sector de San Pedro de Vilcabamba mediante procedimientos GPS. *Maskana* 2:17-25.
- Zêzere, J.L., Reis, E., Garcia, R., Oliveira, S., Rodrigues, M.L., Vieira, G., & Ferreira, A.B. (2004). Integration of spatial and temporal data for the definition of different landslide hazard scenarios in the area north of Lisbon (Portugal). *Natural Hazards and Earth System Science*, 4(1), 133-146.
- Zhou, P., Zhou, B., Guo, J., Li, D., Ding, Z., Feng, Y. (2005). A Demonstrative GPS-aided Automatic Landslide Monitoring System in Sichuan Province. *J Glob Position Syst* 4:184-191. doi: 10.5081/jgps.4.1.184.



ANEXOS

1. Ortoimágen de la ciudad de Loja con límites barriales y toponimios citados en el texto.



2. Documento de petición de los datos históricos de precipitación.

		FORMULARIO DE ENTREGA Y DIFUSIÓN DE INFORMACIÓN METEOROLÓGICA E HIDROLÓGICA		Versión: 1.1	
A). Información del Solicitante:					
Nombres:	JOHN EGVERTO	Solicitud N°			
Apellidos:	SOTO LUZURIAGA	Fecha:	17-03-2016		
Cédula-RUC:	1102655931	Hora :			
Profesión:	INGENIERO EN GEOLOGÍA Y MINAS	Teléfono:	2561128		
Ocupación:	DOCENTE UNIVERSITARIO	Celular:	0982736954		
E-mail:	jesoto@utpl.edu.ec	Institución:	Pública:		
Dirección Domicilio:	Calle Teniente Maximiliano Rodríguez 23-135, barrio Las Peñas.	Privada:	U.T.P.L.		
Ciudad:	LOJA	Facultad:	GEOLOGÍA Y MINAS		
		Pais:	ECUADOR		
B). Detalle de la información solicitada					
SERVICIOS DE CLIMATOLOGÍA		MARQUE CON UNA X			
Estudios climatológicos	<input type="checkbox"/>	Certificaciones Climáticas	<input type="checkbox"/>	Informes Climáticos	<input type="checkbox"/>
Estudios El Niño-La Niña INDICE de Oscilación del Sur (IOS)	<input type="checkbox"/>	Informes de Variabilidad y Cambio Climático	<input type="checkbox"/>	Estudios de Variabilidad y Cambio Climático	<input type="checkbox"/>
Mapas temáticos	<input type="checkbox"/>				
SERVICIOS DE AGROMETEOROLOGÍA					
Mapas temáticos agrometeorológicos	<input type="checkbox"/>	Informes agrometeorológicos	<input type="checkbox"/>	Certificaciones agrometeorológicos	<input type="checkbox"/>
Estudio agrometeorológicas	<input type="checkbox"/>				
SERVICIOS SINÓPTICOS (Tiempo Atmosférico)					
Estudios Sinópticos	<input type="checkbox"/>	Certificaciones Sinópticos	<input type="checkbox"/>	Análisis de las condiciones Sinópticas El Niño-La Niña INDICE de Oscilación del Sur (IOS)	<input type="checkbox"/>
Informes Sinópticos	<input type="checkbox"/>	Mapas temáticos	<input type="checkbox"/>		
SERVICIO DE BOLETINES, PRONÓSTICOS, AVISOS Y ALERTAS					
Boletines Meteorológicos	<input type="checkbox"/>	Pronósticos Climáticos	<input type="checkbox"/>	Alertas Hidrológicas	<input type="checkbox"/>
Boletines Climáticos	<input type="checkbox"/>	Pronósticos Hidrológicos	<input type="checkbox"/>	Avisos Meteorológicos	<input type="checkbox"/>
Boletines Agroclimáticos	<input type="checkbox"/>	Alertas Meteorológicas	<input type="checkbox"/>	Avisos Agroclimáticos	<input type="checkbox"/>
Boletines Hidrológicos	<input type="checkbox"/>	Alerta Climática	<input type="checkbox"/>	Avisos Hidrológicos	<input type="checkbox"/>
Pronósticos 24, 48 y 72 horas	<input type="checkbox"/>	Alertas Agroclimáticos	<input type="checkbox"/>		
SERVICIOS DE INTERCAMBIO DE INFORMACIÓN					
Meta Datos Meteorológico	<input type="checkbox"/>	Información Hidrológica	<input type="checkbox"/>	Información Meteorológica	<input type="checkbox"/>
Series Hidrológicas	<input type="checkbox"/>				
SERVICIOS DE HIDROLOGÍA					
Estudios de Hidrología Superficial	<input type="checkbox"/>	Mapas temáticos	<input type="checkbox"/>	Estudios de Alerta Temprana	<input type="checkbox"/>
SERVICIOS DE HIDROGEOLOGÍA					
Estudios de Hidrología Subterránea	<input type="checkbox"/>	Prospección geofísica	<input type="checkbox"/>	Perfilaje de pozo	<input type="checkbox"/>
SERVICIOS DE HIDROMETRÍA					
Batimetría	<input type="checkbox"/>	Perfil transversal	<input type="checkbox"/>	Aforos líquidos, sólido y toma	<input type="checkbox"/>
SERVICIOS DE INFORMACIÓN EN TIEMPO REAL					
Información en tiempo real automáticas	<input type="checkbox"/>	Información en tiempo real convencional	<input type="checkbox"/>	Información en tiempo real automáticas (hidrológica)	<input type="checkbox"/>
Información en tiempo real convencional	<input type="checkbox"/>				
SERVICIOS DE INFORMACIÓN ESTADÍSTICA					
Estadística diaria (meteorológicas)	<input checked="" type="checkbox"/>	Estadística mensual	<input checked="" type="checkbox"/>	Estadística anual	<input checked="" type="checkbox"/>
Estadística diaria (hidrológicas)	<input type="checkbox"/>	Estadística mensual	<input type="checkbox"/>	Estadística anual (hidrológicas)	<input type="checkbox"/>
Anuarios meteorológicos	<input type="checkbox"/>	Anuarios hidrológicos	<input type="checkbox"/>	Publicaciones técnicas	<input type="checkbox"/>
Publicaciones técnicas (hidrológicas)	<input type="checkbox"/>				

	FORMULARIO DE ENTREGA Y DIFUSIÓN DE INFORMACIÓN METEOROLÓGICA E HIDROLÓGICA	Versión: 1.1
SERVICIOS DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO		
Proyectos de investigación relacionados con el Clima, tiempo y agua. <input checked="" type="checkbox"/> Innovación y desarrollo <input type="checkbox"/> Diseño de prototipos		
C) Industria o Sector de interés:		
_____ _____ _____ _____ _____ _____ _____		
D) Periodicidad:	E) Finalidad de la información:	
Inmediata <input type="checkbox"/> Diaria <input type="checkbox"/> Mensual <input type="checkbox"/> Semestral <input type="checkbox"/> Anual <input type="checkbox"/>	Estudio <input type="checkbox"/> Proyecto <input type="checkbox"/> Tesis <input checked="" type="checkbox"/> Investigación <input checked="" type="checkbox"/> Otros <input type="checkbox"/>	
F) Acuerdo de compromiso		
<u>Por la presente manifiesto mi compromiso de:</u>		
a) Aceptar las condiciones y características de la información recibida. b) No reproducir en forma total o parcial la información recibida, garantizando su manejo y uso responsable de acuerdo con el protocolo institucional. c) No comercializar o conceder a terceros, a cualquier título, en forma total o parcial la información recibida. d) Entregar al INAMHI un ejemplar del producto generado con la información entregada como una contribución al desarrollo del e) Reconocer en forma documentada y pública la fuente y autoría de la información a nombre del INAMHI.		
G) Condiciones generales:		
a) En caso de requerir que la información sea enviada por correo nacional o internacional, el solicitante deberá cubrir los gastos de envío. b) Si la información es valorada, se cancelará el valor correspondiente de acuerdo con el Reglamento interno del INAMHI. c) Si la información es para uso académico o tesis, adjuntar justificativo del Centro de Estudios. d) El INAMHI se reserva el derecho de autorizar o no la entrega de la información de acuerdo a su política interna, lo cual será informado		
Firma del solicitante:	Responsable Atención al Usuario:	
		
_____	_____	
2		

4. Inventario de los movimientos de ladera.

ITEM	Código	Área (m2)	Tipología	Año de inventario	Litología	Formación geológica
1	ML48	4283.53	Reptacional	2015	Arcillas limosas	Trigal
2	ML49	11886.07	Reptacional	2015	Arcillas limosas	Trigal
3	ML50	5454.47	Flujo	2015	Arcillas limosas	Trigal
4	ML51	1896.91	Reptacional	2010	Arcillas limosas	Chiguinda
5	ML52	5230.85	Reptacional	2010	Esquisto, micaesquistos, cuarcitas	Chiguinda
6	ML53	6747.91	Flujo	2010	Arcillas limosas	Trigal
7	ML54	532.32	Flujo	2015	Esquisto, micaesquistos, cuarcitas	Trigal
8	ML55	22215.82	Reptacional	2010	Arcillas limosas	Chiguinda
9	ML56	9684.18	Reptacional	2010	Arcillas limosas	Trigal
10	ML41	6183.82	Flujo	1999	Arcillas limosas	Trigal
11	ML57	9047.24	Flujo	2010	Arcillas limosas	Trigal
12	ML58	1572.91	Reptacional	2010	Arcillas limosas	Trigal
13	ML42	16028.07	Reptacional	1999	Arcillas limosas	Chiguinda
14	ML43	6098.18	Reptacional	1999	Arcillas limosas	Chiguinda
15	ML44	4965.60	Traslacional	1999	Esquisto, micaesquistos, cuarcitas	Chiguinda
16	ML59	8629.57	Flujo	2010	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
17	ML60	16524.57	Reptacional	2015	Coglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
18	ML61	928.40	Flujo	2015	Coglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
19	ML62	1539.42	Flujo	2015	Coglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
20	ML63	4528.05	Flujo	2010	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
21	ML64	1128.62	Flujo	2010	Lutitas calcáreas	San Cayetano
22	ML65	1957.52	Flujo	2003	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
23	ML66	2480.74	Flujo	2010	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
24	ML67	12523.69	Flujo	2003	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
25	ML68	755.02	Reptacional	2015	Lutitas calcáreas	San Cayetano
26	ML69	36112.04	Flujo	2010	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Trigal
27	ML70	15194.03	Flujo	2010	Coluviones	Depósitos coluviales
28	ML71	9211.87	Reptacional	2010	Coluviones	Depósitos coluviales
29	ML72	5731.19	Flujo	2015	Coluviones	Depósitos coluviales
30	ML73	27051.56	Reptacional	2015	Coluviones	Depósitos coluviales
31	ML74	6397.62	Reptacional	2015	Coluviones	Depósitos coluviales
32	ML75	1728.27	Flujo	2003	Lutitas calcáreas	San Cayetano
33	ML76	6893.35	Reptacional	2015	Lutitas calcáreas	San Cayetano
34	ML77	3781.53	Flujo	2015	Lutitas calcáreas	San Cayetano
35	ML78	15364.45	Flujo	2015	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
36	ML79	4085.29	Flujo	2015	Lutitas calcáreas	San Cayetano
37	ML80	1924.13	Reptacional	2015	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
38	ML37	7459.62	Flujo	1999	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
39	ML81	8180.72	Flujo	2015	Coglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
40	ML82	1678.23	Flujo	2015	Coglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
41	ML83	1500.93	Reptacional	2015	Coglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
42	ML84	40639.59	Flujo	2015	Coglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
43	ML38	11684.08	Reptacional	1999	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
44	ML85	16715.47	Reptacional	2015	Coglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
45	ML86	36079.63	Reptacional	2010	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
46	ML87	3688.71	Flujo	2015	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
47	ML88	6517.69	Flujo	2015	Coluviones	Depósitos coluviales
48	ML89	51249.50	Reptacional	2015	Arcillas limosas	Trigal
49	ML90	265169.37	Reptacional	2015	Coluviones	Trigal
50	ML33	57235.14	Reptacional	2015	Areniscas gruesas	Belén
51	ML91	12422.17	Flujo	2010	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
52	ML92	6152.42	Reptacional	2015	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
53	ML93	4835.65	Flujo	2015	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
54	ML94	66582.74	Flujo	2003	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Trigal
55	ML95	124112.97	Reptacional	2015	Coluviones	Depósitos coluviales
56	ML96	5333.34	Reptacional	2015	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Trigal
57	ML97	5735.72	Reptacional	2010	Limolitas con lutitas calcáreas	La Banda
58	ML98	43874.58	Flujo	2003	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Belén
59	ML99	10187.97	Flujo	2015	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Trigal
60	ML100	2703.89	Reptacional	2015	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Trigal

Análisis de la peligrosidad frente a los movimientos de ladera en la cuenca de Loja (Ecuador)

ITEM	Código	Área (m2)	Tipología	Año de inventario	Litología	Formación geológica
61	ML101	5008.90	Reptacional	2015	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Trigal
62	ML102	10248.42	Flujo	2010	Limolitas con lutitas calcáreas	La Banda
63	ML45	20398.54	Flujo	1999	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Belén
64	ML47	5084.37	Reptacional	1999	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Belén
65	ML103	68587.26	Reptacional	2010	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Trigal
66	ML104	13600.87	Flujo	2015	Arcillas limosas	Belén
67	ML46	2277.48	Reptacional	1999	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Belén
68	ML27	42236.03	Flujo	1999	Limolitas con lutitas calcáreas	La Banda
69	ML105	10650.91	Reptacional	2010	Lutitas calcáreas	La Banda
70	ML106	2787.92	Traslacional	2010	Lutitas calcáreas	La Banda
71	ML107	17913.64	Reptacional	2015	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Belén
72	ML24	42894.06	Reptacional	1999	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Belén
73	ML108	1729.89	Reptacional	2015	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Belén
74	ML109	28042.91	Flujo	2015	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Belén
75	ML110	4256.12	Flujo	2015	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Belén
76	ML111	2289.77	Flujo	2003	Arcillas limosas	Belén
77	ML112	14329.37	Reptacional	2015	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Belén
78	ML113	989.27	Flujo	2015	Coglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
79	ML114	34243.66	Reptacional	2010	Limolitas con lutitas calcáreas	La Banda
80	ML115	23145.36	Reptacional	2015	Lutitas calcáreas	La Banda
81	ML116	40581.80	Reptacional	2015	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Trigal
82	ML117	26171.47	Flujo	2015	Lutitas calcáreas	Belén
83	ML118	86436.95	Reptacional	2003	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	La Banda
84	ML119	14072.93	Flujo	2010	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Belén
85	ML120	9517.43	Flujo	2015	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Belén
86	ML121	16446.09	Flujo	2010	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Belén
87	ML122	76772.73	Reptacional	2015	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Belén
88	ML11	10125.41	Reptacional	1999	Coglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
89	ML123	195758.41	Reptacional	2010	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Belén
90	ML124	35617.18	Reptacional	2010	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Belén
91	ML125	212043.34	Reptacional	2003	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Belén
92	ML126	122928.79	Reptacional	2003	Coglomerados con matriz limo-arenosa	Belén
93	ML127	74261.36	Reptacional	2010	Coglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
94	ML128	34046.78	Flujo	2003	Coglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
95	ML129	9003.78	Reptacional	2010	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Belén
96	ML130	614.70	Traslacional	2015	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Belén
97	ML131	4404.18	Flujo	2003	Coglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
98	ML132	991.99	Reptacional	2015	Coglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
99	ML133	6283.58	Flujo	2010	Coglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
100	ML134	31166.30	Reptacional	2010	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Belén
101	ML135	172326.57	Reptacional	2010	Coglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
102	ML136	13159.30	Flujo	2010	Coglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
103	ML137	947.93	Flujo	2010	Coglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
104	ML138	448.70	Reptacional	2015	Areniscas gruesas	Belén
105	ML139	2743.69	Flujo	2003	Areniscas gruesas	Belén
106	ML140	10592.78	Reptacional	2003	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
107	ML141	7377.31	Flujo	2015	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
108	ML142	6657.71	Flujo	2010	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
109	ML143	13279.51	Flujo	2015	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
110	ML144	1194.85	Flujo	2010	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
111	ML145	1026.45	Traslacional	2010	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
112	ML146	2838.13	Flujo	2015	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
113	ML147	2313.06	Reptacional	2015	Lutitas calcáreas	San Cayetano
114	ML148	927.29	Reptacional	2015	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
115	ML149	5144.27	Reptacional	2015	Intercalaciones de arcilla, limo, conglomerado	San Cayetano
116	ML150	31588.96	Reptacional	2003	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
117	ML151	1642.44	Reptacional	2015	Intercalaciones de arcilla, limo, conglomerado	San Cayetano
118	ML152	3782.68	Reptacional	2015	Intercalaciones de arcilla, limo, conglomerado	San Cayetano
119	ML153	4601.87	Flujo	2003	Intercalaciones de arcilla, limo, conglomerado	San Cayetano
120	ML154	5564.40	Flujo	2010	Intercalaciones de arcilla, limo, conglomerado	San Cayetano

ITEM	Código	Área (m2)	Tipología	Año de inventario	Litología	Formación geológica
121	ML155	6395.38	Flujo	2003	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
122	ML156	25864.42	Reptacional	2003	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
123	ML157	1757.72	Reptacional	2015	Intercalaciones de arcilla, limo, conglomerado	San Cayetano
124	ML158	7621.89	Reptacional	2010	Intercalaciones de arcilla, limo, conglomerado	Quillollaco
125	ML159	24146.77	Reptacional	2015	Coglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
126	ML160	80699.44	Reptacional	2015	Coglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
127	ML161	8800.50	Flujo	2015	Coglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
128	ML162	1937.07	Flujo	2015	Coglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
129	ML163	868.75	Flujo	2015	Esquisto, micaesquistos, cuarcitas	Chiguinda
130	ML164	15296.77	Traslacional	2010	Esquisto, micaesquistos, cuarcitas	Chiguinda
131	ML165	1540.68	Flujo	2010	Esquisto, micaesquistos, cuarcitas	Chiguinda
132	ML166	6741.79	Traslacional	2010	Esquisto, micaesquistos, cuarcitas	Chiguinda
133	ML167	5465.92	Reptacional	2015	Intercalaciones de arcilla, limo, conglomerado	San Cayetano
134	ML20	1557.46	Reptacional	1999	Intercalaciones de arcilla, limo, conglomerado	San Cayetano
135	ML4	45854.92	Reptacional	1999	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
136	ML168	18112.66	Flujo	2010	Intercalaciones de arcilla, limo, conglomerado	San Cayetano
137	ML2	9502.36	Flujo	1999	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
138	ML169	1751.06	Flujo	2010	Intercalaciones de arcilla, limo, conglomerado	San Cayetano
139	ML170	1673.50	Flujo	2010	Intercalaciones de arcilla, limo, conglomerado	San Cayetano
140	ML171	5542.78	Reptacional	2015	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
141	ML172	2098.29	Flujo	2010	Intercalaciones de arcilla, limo, conglomerado	San Cayetano
142	ML173	1220.14	Flujo	2010	Intercalaciones de arcilla, limo, conglomerado	San Cayetano
143	ML1	11152.51	Flujo	1999	Arcillas limosas	San Cayetano
144	ML174	3718.08	Reptacional	2015	Intercalaciones de arcilla, limo, conglomerado	San Cayetano
145	ML175	4358.24	Flujo	2003	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
146	ML176	564.57	Reptacional	2015	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
147	ML177	713.12	Reptacional	2015	Arcillas limosas	San Cayetano
148	ML178	360.08	Flujo	2015	Arcillas limosas	San Cayetano
149	ML179	1195.49	Flujo	2010	Arcillas limosas	San Cayetano
150	ML180	5881.61	Reptacional	2015	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
151	ML7	8551.68	Flujo	1999	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
152	ML181	9957.01	Flujo	2003	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
153	ML182	5796.43	Reptacional	2015	Intercalaciones de arcilla, limo, conglomerado	San Cayetano
154	ML183	2043.83	Reptacional	2003	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
155	ML184	6696.99	Reptacional	2015	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
156	ML185	1703.83	Flujo	2015	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
157	ML186	2033.31	Flujo	2015	Coglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
158	ML187	3416.38	Flujo	2015	Coglomerados con matriz limo-arenosa	Chiguinda
159	ML188	185.58	Reptacional	2010	Aluviales	Quillollaco
160	ML189	8487.33	Flujo	2010	Coglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
161	ML190	4182.01	Reptacional	2010	Conglomerado con matriz arcillo-limosa	Quillollaco
162	ML191	6944.51	Traslacional	2010	Conglomerado con matriz arcillo-limosa	Quillollaco
163	ML192	4634.93	Flujo	2015	Conglomerado con matriz arcillo-limosa	Quillollaco
164	ML193	149473.99	Flujo	2015	Intercalaciones de arcilla, limo, conglomerado	Quillollaco
165	ML194	4601.65	Traslacional	2010	Coglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
166	ML195	4086.25	Flujo	2015	Coglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
167	ML196	101412.83	Reptacional	2010	Coglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
168	ML197	3990.23	Traslacional	2010	Coglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
169	ML198	13431.73	Reptacional	2010	Intercalaciones de arcilla, limo, conglomerado	Quillollaco
170	ML199	22346.11	Flujo	2010	Intercalaciones de arcilla, limo, conglomerado	Quillollaco
171	ML200	1196.54	Flujo	2003	Coglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
172	ML201	383.89	Reptacional	2015	Coglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
173	ML202	1979.36	Traslacional	2010	Conglomerado con matriz arcillo-limosa	Quillollaco
174	ML203	14903.09	Reptacional	2010	Esquisto, micaesquistos, cuarcitas	Chiguinda
175	ML204	497.04	Reptacional	2010	Coglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
176	ML205	800.76	Flujo	2010	Coglomerados con matriz limo-arenosa	Chiguinda
177	ML206	380.77	Flujo	2015	Esquisto, micaesquistos, cuarcitas	Chiguinda
178	ML207	2098.05	Flujo	2010	Esquisto, micaesquistos, cuarcitas	Chiguinda
179	ML208	33080.20	Reptacional	2010	Coglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco

Análisis de la peligrosidad frente a los movimientos de ladera en la cuenca de Loja (Ecuador)

ITEM	Código	Área (m2)	Tipología	Año de inventario	Litología	Formación geológica
180	ML209	17540.04	Flujo	2015	Esquisto, micaesquistos, cuarcitas	Chiguinda
181	ML210	14796.60	Reptacional	2010	Esquisto, micaesquistos, cuarcitas	Chiguinda
182	ML211	8751.81	Traslacional	2010	Cglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
183	ML212	26278.36	Reptacional	2010	Cglomerados con matriz limo-arenosa	San Cayetano
184	ML213	14185.18	Reptacional	2015	Cglomerados con matriz limo-arenosa	San Cayetano
185	ML214	3525.21	Reptacional	2010	Coluviones	Quillollaco
186	ML30	4357.95	Reptacional	1999	Coluviones	Quillollaco
187	ML215	1231.09	Reptacional	2010	Esquisto, micaesquistos, cuarcitas	Chiguinda
188	ML216	3644.21	Reptacional	2010	Esquisto, micaesquistos, cuarcitas	Chiguinda
189	ML217	4445.94	Reptacional	2010	Coluviones	Quillollaco
190	ML218	3209.97	Flujo	2010	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
191	ML29	10181.05	Rotacional	1999	Coluviones	Quillollaco
192	ML219	935.93	Traslacional	2010	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
193	ML220	2838.83	Traslacional	2010	Esquisto, micaesquistos, cuarcitas	Chiguinda
194	ML221	8945.60	Reptacional	2003	Coluviones	Depósitos coluviales
195	ML222	4615.64	Reptacional	2003	Coluviones	Depósitos coluviales
196	ML223	456.06	Flujo	2010	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
197	ML224	1621.88	Reptacional	2003	Lutitas calcáreas	San Cayetano
198	ML39	2602.32	Flujo	1999	Cglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
199	ML40	2663.58	Reptacional	1999	Cglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
200	ML225	3469.55	Flujo	2010	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
201	ML226	2559.69	Flujo	2010	Lutitas calcáreas	San Cayetano
202	ML227	4568.28	Flujo	2010	Lutitas calcáreas	San Cayetano
203	ML228	6003.17	Reptacional	2003	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
204	ML229	4816.65	Reptacional	2010	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
205	ML230	6115.61	Flujo	2010	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
206	ML231	2204.53	Traslacional	2003	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
207	ML232	1174.83	Flujo	2003	Coluviones	Depósitos coluviales
208	ML23	749.22	Reptacional	1999	Coluviones	Depósitos coluviales
209	ML36	19103.42	Reptacional	1999	Coluviones	Depósitos coluviales
210	ML233	26377.41	Reptacional	2003	Coluviones	Depósitos coluviales
211	ML234	2713.12	Reptacional	2003	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
212	ML235	450.26	Traslacional	2003	Lutitas calcáreas	San Cayetano
213	ML236	335.14	Reptacional	2003	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
214	ML237	1595.00	Reptacional	2003	Lutitas calcáreas	San Cayetano
215	ML238	1530.09	Flujo	2003	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
216	ML239	4603.41	Reptacional	2003	Areniscas gruesas	Belén
217	ML240	9854.67	Reptacional	2003	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Trigal
218	ML241	873.41	Flujo	2003	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	La Banda
219	ML242	4545.82	Flujo	2003	Lutitas bien estratificadas	La Banda
220	ML243	3921.61	Reptacional	2003	Lutitas bien estratificadas	La Banda
221	ML244	487.91	Reptacional	2003	Lutitas bien estratificadas	La Banda
222	ML246	3931.47	Reptacional	2003	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Belén
223	ML247	805.40	Reptacional	2003	Coluviones	Trigal
224	ML248	515.12	Reptacional	2003	Intercalaciones de arcilla, limo, conglomerado	San Cayetano
225	ML249	2988.09	Flujo	2003	Intercalaciones de arcilla, limo, conglomerado	San Cayetano
226	ML250	5599.05	Flujo	2003	Intercalaciones de arcilla, limo, conglomerado	San Cayetano
227	ML251	1378.63	Reptacional	2003	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
228	ML252	499.85	Reptacional	2003	Intercalaciones de arcilla, limo, conglomerado	San Cayetano
229	ML253	956.41	Flujo	2003	Intercalaciones de arcilla, limo, conglomerado	San Cayetano
230	ML254	2995.33	Flujo	2003	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
231	ML255	6310.00	Reptacional	2003	Intercalaciones de arcilla, limo, conglomerado	San Cayetano
232	ML256	746.06	Flujo	2003	Cglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
233	ML257	2692.50	Reptacional	2003	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Belén
234	ML258	2867.20	Reptacional	2003	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Belén
235	ML259	2478.18	Reptacional	2003	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	La Banda
236	ML260	2048.94	Reptacional	2003	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Belén
237	ML261	18786.74	Reptacional	2003	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Belén
238	ML262	2603.28	Flujo	2003	Cglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco

Análisis de la peligrosidad frente a los movimientos de ladera en la cuenca de Loja (Ecuador)

ITEM	Código	Área (m2)	Tipología	Año de inventario	Litología	Formación geológica
239	ML263	3156.26	Flujo	2003	Cglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
240	ML264	1572.65	Flujo	2003	Esquisto, micaesquistos, cuarcitas	Chiguinda
241	ML265	878.91	Flujo	2003	Esquisto, micaesquistos, cuarcitas	Chiguinda
242	ML266	2523.64	Reptacional	2003	Esquisto, micaesquistos, cuarcitas	Chiguinda
243	ML267	4901.86	Reptacional	2003	Esquisto, micaesquistos, cuarcitas	Chiguinda
244	ML268	6574.39	Reptacional	2003	Esquisto, micaesquistos, cuarcitas	Chiguinda
245	ML269	4211.86	Reptacional	2003	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Belén
246	ML270	719.06	Reptacional	2003	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Belén
247	ML271	14190.20	Flujo	2003	Cglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
248	ML272	5383.70	Reptacional	2003	Cglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
249	ML273	2193.58	Flujo	2003	Cglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
250	ML274	6139.53	Reptacional	2003	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Belén
251	ML275	3598.37	Reptacional	2003	Cglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
252	ML22	1357.38	Reptacional	1999	Areniscas gruesas	Belén
253	ML26	1473.93	Reptacional	1999	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Chiguinda
254	ML25	354.97	Reptacional	1999	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Belén
255	ML3	2086.26	Reptacional	1999	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
256	ML17	505.09	Reptacional	1999	Cglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
257	ML16	658.08	Reptacional	1999	Intercalaciones de arcilla, limo, conglomerado	San Cayetano
258	ML31	245.25	Reptacional	1999	Cglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
259	ML13	72.38	Reptacional	1999	Cglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
260	ML14	84.74	Reptacional	1999	Cglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
261	ML19	717.93	Reptacional	1999	Aluviales	Depósitos coluviales
262	ML6	272.56	Reptacional	1999	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
263	ML28	824.86	Reptacional	1999	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Belén
264	ML15	1095.54	Reptacional	1999	Cglomerado con matriz arcillo-limosa	Quillollaco
265	ML21	966.19	Reptacional	1999	Cglomerado con matriz arcillo-limosa	Quillollaco
266	ML276	1725.04	Traslacional	2010	Cglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
267	ML277	2972.91	Flujo	2003	Cglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
268	ML278	6525.73	Flujo	2003	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Quillollaco
269	ML279	3325.13	Reptacional	2010	Areniscas con lutitas y lentes de conglomerado	Belén
270	ML280	6046.46	Flujo	2003	Cglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
271	ML281	5564.22	Reptacional	2003	Cglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
272	ML18	2069.25	Flujo	1999	Cglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
273	ML282	19423.82	Flujo	2010	Cglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
274	ML283	428.38	Traslacional	2010	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
275	ML284	92.34	Reptacional	2010	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
276	ML285	16660.16	Reptacional	2010	Intercalaciones de arcilla, limo, conglomerado	Quillollaco
277	ML286	2915.95	Reptacional	2003	Cglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
278	ML287	6433.74	Reptacional	2010	Cglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
279	ML288	6406.31	Reptacional	2010	Esquisto, micaesquistos, cuarcitas	Chiguinda
280	ML289	12362.74	Flujo	2010	Coluviones	San Cayetano
281	ML290	687.37	Flujo	2010	Cglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
282	ML10	835.54	Flujo	1999	Intercalaciones de arcilla, limo, conglomerado	San Cayetano
283	ML9	4142.40	Flujo	1999	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
284	ML8	90.99	Reptacional	1999	Intercalaciones de arcilla, limo, conglomerado	San Cayetano
285	ML5	737.89	Flujo	1999	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
286	ML32	410.31	Reptacional	1999	Lutitas bien estratificadas	San Cayetano
287	ML34	8548.64	Flujo	2003	Areniscas gruesas	Belén
288	ML35	1146.71	Reptacional	2003	Areniscas gruesas	Belén
289	ML12	3294.56	Reptacional	1999	Cglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
290	ML291	83196.90	Traslacional	1999	Cglomerados con matriz limo-arenosa	Quillollaco
291	ML193	149473.99	Flujo	2015	Intercalaciones de arcilla, limo, conglomerado	Quillollaco
292	ML29	10181.05	Rotacional	1999	Coluviones	Quillollaco

5. Datos de laboratorio de los cuatro casos analizados a detalle

Movimientos de ladera	Límites de Atterberg (%)			W (%)	No. Muestra
	LL	LP	IP		
La Florida	24.5	17.13	7.37	8.7	M7
	26.9	16.88	10.02	5.3	M8
	31.5	23.87	7.6	5.7	M13
	64.2	20.94	43.26	26.88	M1
	53.8	19.18	34.62	22.51	M14
	53.8	17.82	35.98	18.73	M15
	91.3	32.86	58.44	30.72	M9
	81.7	31.17	50.53	24.54	M5
	31.7	24.1	7.6	42.59	M6
	84.6	22.52	62.08	3.61	M10
	31.2	25.78	5.42	5.03	M2
	36.5	21.32	15.18	5.86	M11
	45.8	28.5	17.25	3.4	M12
30.3	24.98	5.32	13.36	M4	
El Plateado	90.2	46.64	43.56	33.25	M3
	95.8	51.34	44.46	43.89	M4
	78.77	48.48	30.29	37.07	M2
	78.6	46.52	32.08	31.73	M5
	56.1	27.8	28.3	22.84	M1
	53.4	24.56	28.84	30.48	M9
	53.4	29.38	24.02	25.53	M6
	54.3	21.32	32.98	19.35	M7
	75.8	25.55	50.25	38.19	M10
	81.7	24.28	57.42	44.71	M11
	71.5	28.74	42.75	33.98	M8
54.75	26.18	28.57	30.48	M12	
San Cayetano	81.6	57.41	24.19	41.79	M2
	67.2	54.14	13.06	37.58	M3
	58.7	36.2	22.5	35.21	M1
	53.1	23.56	29.54	19.14	M8
	38.3	29.29	9.01	24.8	M4
	33.2	21.46	11.74	19.07	M7
	39.5	23.11	16.39	19.14	M6
	24	18	6	5.22	M5
Chontacruz	37.9	28.32	9.58	21.31	M3
	41.2	31.84	9.36	23.76	M1
	19.8	16.89	2.91	12.97	M4
	29.9	23.13	6.77	23.1	M2
	30.9	29.75	10.15	21.03	M7
	61.9	35.79	26.11	35.49	M10
	52.9	22.81	30.09	31.8	M8
	68.7	31.85	36.85	37.51	M9
	37.8	22.36	15.44	10.02	M6
33.3	20.82	12.48	6.54	M5	

6. Publicaciones

A multi-method approach for the characterization of landslides in an intramontane basin in the Andes (Loja, Ecuador)

John Soto, Jorge P. Galve, José Antonio Palenzuela, José Miguel Azañón, José Tamay Clemente Irigaray.

Landslides

DOI 10.1007/s10346-017-0830-y

Received: 14 June 2016

Accepted: 31 March 2017

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017

Estimation of empirical rainfall thresholds for landslide triggering using partial duration series and their relation with climatic cycles. An application in southern Ecuador

John Soto, José Antonio Palenzuela, Jorge P. Galve, Juan Antonio Luque, José Miguel Azañón, José Tamay, Clemente Irigaray.

Bulletin of Engineering Geology and the Environment

<https://doi.org/10.1007/s10064-017-1216-z>

Received: 1 June 2017 /Accepted: 1 December 2017

Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2017

A multi-method approach for the characterization of landslides in an intramontane basin in the Andes (Loja, Ecuador)

Abstract In the last several decades, population growth in the cities of the Andes has caused urban areas to expand into landslide-prone areas. Fatal landslides affecting urban settlements are especially frequent in cities located in the Neogene intramontane basins of the Andes. These basins have similar situations and include geographical and geological features that frequently generate ground instabilities. We studied the characteristics of the mass movements observed in these basins by carrying out a detailed analysis of four landslides that have occurred in the Loja Basin (Ecuador). This multi-method study integrated geophysical, geotechnical methods, mineralogical studies and analyses of precipitation time series. Our study characterizes the slope movements as active, slow-moving, complex earthslide earthflows. According to Differential GPS measurements, these landslides move at velocities of up to several metres per year. Electrical resistivity tomography profiles show that most of the landslides are mainly surficial. Time-series analyses of precipitation reveal that rainfall events that are not exceptionally intensive can reactivate these landslides. This characteristic and the development of these landslides on low-gradient slopes are explained using the results obtained from the geotechnical and mineralogical analyses. We find that the smectite clay minerals detected in the mobilized geological formations, combined with the tropical climate of the northern Andean region, induce the observed weak slope stability conditions. The conceptual model for the studied landslides may aid in assessing landslide-prone areas in Loja and other Neogene intramontane basins of the Andes and can help to mitigate the associated risks.

Keywords Landslides · DGPS · ERT · Geotechnics · Clay minerals · Time-series analysis

Introduction

Urban growth in Andean cities has increased the exposure of the population to landslides. This growth demands new terrain for urban development and has led to the deforestation and occupation of hillsides. First, deforestation is a primary factor that causes shallow landsliding and intensifies torrent-related phenomena. Second, the urbanization of hillsides is always linked to an implicit risk of landslides because of the poor ground conditions of the slopes. These slope stability conditions are worse where the humid climates of tropical and subtropical latitudes enhance rock weathering. If we also consider the frequent earthquakes that strike the northern Andean region, the result is one of the world's regions with the highest density of fatal landslides (Petley 2012; Alcántara-Ayala and Oliver-Smith 2014). The serious consequences of this are reflected in the number of casualties and the economic losses due to landslides reported from this region (Fig. 1, Table 1).

A large number of fatal landslides occur in a specific geological setting within the Andean Cordillera, the Neogene intramontane basins. These basins have similar geographical and geological characteristics that explain the high incidence of these phenomena (Marocco et al. 1994). They feature a humid tropical climate and contain fine-grained, continental sedimentary rocks deposited in fluvial and lacustrine environments. When combined, these characteristics frequently generate ground instability conditions (Ibadango et al. 2005). The latter, combined with the rapid urban development that has occurred in those areas, results in situations with high landslide risk. Although landslides have substantial impacts at a societal and economical level, comprehensive studies of mass movements have not been carried out in these areas. Most of the published studies are focused on general descriptions of specific cases (e.g. PMA 2007) and do not include detailed geotechnical, geophysical or kinematic analyses.

This study seeks to characterize and contextualize the mass movements typically observed in Andean Neogene intramontane basins. We have approached this study by analysing in detail four active landslides in the city of Loja (Ecuador). We applied different techniques to provide information about the main characteristics of these landslides. Their kinematics were studied by carrying out Differential Global Positioning System (DGPS) monitoring (e.g. Tagliavini et al. 2007; Acar 2010; Acar et al. 2008; Yin et al. 2010a; Zarate 2011; Calcaterra et al. 2012; Wang 2012; Dogan et al. 2013). GPS-based methods are effective for measuring displacements in landslides (Gili et al. 2000; Malet et al. 2002; Mora et al. 2003; Yin et al. 2010b; Giordan et al. 2013) because they allow the measurement of movement rates as low as several millimetres per year (Zhou et al. 2005). Currently, they are neither too expensive nor too demanding techniques that can be applied where continuous monitoring is not required (e.g. Rizzo 2002; Brückl et al. 2006; Noferini et al. 2007; Coltorti et al. 2011). The geometries of the landslide masses, failure planes and areas characterized by high water content were established by analysing longitudinal and transverse electrical resistivity tomography (ERT) profiles (e.g. Lapenna et al. 2003, 2005; Bichler et al. 2004; Travelletti et al. 2009; Hibert et al. 2012; Colangelo et al. 2008; Colangelo and Perrone 2012; Merritt et al. 2014). The causal factors were established through geotechnical and mineralogical characterizations of the materials involved in the landslides (e.g. Yılmaz and Karacan 2002; Azañón et al. 2010; Regmi et al. 2013; Grana and Tommasi 2014). Landslide triggering or reactivation rainfall thresholds were defined by carrying out an analysis of precipitation time series. This analysis was performed by making a simple comparison between the cumulative rainfall recorded during the wet period related to every landslide and the mean rainfall for the same period when considering the existing rainfall series (1964–



Estimation of empirical rainfall thresholds for landslide triggering using partial duration series and their relation with climatic cycles. An application in southern Ecuador

John Soto^{1,2} · José Antonio Palenzuela³ · Jorge P. Galve² · Juan Antonio Luque⁴ · José Miguel Azañón² · José Tamay¹ · Clemente Irigaray³

Received: 1 June 2017 / Accepted: 1 December 2017
© Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2017

Abstract

Rainfall-induced landslides constitute a major cause of damage and fatalities throughout the intramontane basins of the Andes. The geological and climatic setting plays a key role in the generation of a high number of landslides in this area. For this reason, a greater understanding of the relationship between landslide frequency and climate conditions is necessary to mitigate human and economic losses. Accordingly, this paper presents an analysis of rainfall variables associated with a series of dated landslides (153 in total) in the southern Ecuador basin of Loja. This analysis was performed by applying an affordable empirical method that enables the calculation of critical rainfall threshold (CRT) curves. This calculation is based on an in-depth examination of rainfall parameters, such as cumulative precipitation and mean intensity, linked to a wide range of rainfall duration (from 1 to 90 days). The inspection of these parameters was addressed considering their frequency, which was calculated by using partial duration series (PDS), taking into account the entire rainfall record. This work has revealed that only 24% of landslides were triggered by rainfall conditions with maximum return periods greater than 1 year, whereas the rest did not exceed that return period. After finding the best correlation between the maximum return periods and the maximum mean intensity, a minimum power law function was adjusted to the CRT curve that correlates duration and cumulative rainfall. The values for this CRT function resulted in 5.14 and 0.83 for its scaling constant (α) and shape parameter (β), respectively. In addition, a spectral analysis was conducted to detect climatic cycles on the entire rainfall record. In general, a clear correlation could not be established between climatic frequencies and significant rainfall events inducing landslides, although similarly return periods were found for a critical rainfall event of March 2015 (10.4 years) and the SUNSPOT cycles (10.5–12 years). The results derived from this research are significantly valuable for the prevention of future mass-movements, although additional data will be crucial to update and calibrate CRT curves to study the influence of climate on landslide event frequency and magnitude in Loja.

Keywords Return period · Rainfall threshold · Landslides · Spectral analysis · Climatic cycles

Introduction

Landslides occur frequently as a consequence of intensive rainfall. These geomorphic processes generate risk situations and sometimes lead to disasters with magnitudes similar to those of other natural hazardous phenomena. The destructive potential of mass movements increases with the urban development of landslide-prone areas (Aleotti and Chowdhury 1999; Guzzetti et al. 1999). Thus, the damage due to landslides in human and monetary terms is rising because of the urban growth observed in cities located in mountain settings. This trend is evident in the data compiled in the literature specializing in landslide events (e.g., Unesco 1973–79;

✉ John Soto
jesoto@utpl.edu.ec

¹ Departamento de Geología y Minas e Ingeniería Civil, Universidad Técnica Particular de Loja, Ap. 1101608 Loja, Ecuador

² Departamento de Geodinámica, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, Campus Fuentenueva s/n, 18071 Granada, Spain

³ Department of Civil Engineering, ETSICCP, University of Granada, Campus Fuentenueva s/n, 18071 Granada, Spain

⁴ Instituto Geológico y Minero de España, Urb. Alcázar del Genil, 4 bajo, Edificio Zulema, 18006 Granada, Spain