



**UNIVERSIDAD  
DE GRANADA**

---

**Análisis de la evolución del uso de terreno  
costero contiguo a zona urbanizada y su  
influencia en edificaciones: proyecciones a  
corto, medio y largo plazo en el sur de Chile**

---

**Tesis Doctoral**

Para la obtención del

Grado de doctor por la Universidad de Granada

**Andrés Marcelo García Ruiz**

Directores:

**Manuel Díez Minguito, Manuel Carpio Martínez**

Programa de Doctorado en Dinámica de Flujos Biogeoquímicos y sus  
Aplicaciones (B24/56/1)

Universidad de Granada

**2023**

Editor: Universidad de Granada. Tesis Doctorales  
Autor: Andrés Marcelo García Ruiz  
ISBN: 978-84-1195-209-5  
URI: <https://hdl.handle.net/10481/89843>

*A mis Padres por su apoyo incondicional*

*A mis Hermanos y amigos por sus consejos*

*A Paula por acompañarme siempre en esta aventura*

*A María Ignacia, Martina y Pepa por su cariño permanente*

## **Agradecimientos**

Deseo comenzar agradeciendo a mis padres, Lutigarda Ruiz y Lorenzo Garcia, y a mi amada esposa Paula, quienes me han apoyado y brindado su amor incondicional durante todo este proceso y en mi vida.

Quiero expresar mi agradecimiento a mis profesores tutores, Manuel Diez y Manuel Carpio, por su experiencia y conocimiento que me han guiado y aconsejado en cada uno de los capítulos de esta tesis, así como por estar siempre disponibles para responder mis preguntas tanto en la investigación como profesionalmente.

También quiero agradecer la oportunidad de contribuir con mi investigación a muchas personas que podrían beneficiarse de los resultados en nuestro futuro climático incierto.

Por último, agradezco a mis amigos y compañeros de trabajo por su buen humor, consejos y compañía, quienes me han apoyado en este proceso.

---

## Índice General

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN, MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS</b>	<b>1</b>
1.1 Introducción	1
1.2 Motivación	6
1.3 Objetivos	9
1.3.1 Objetivo General	9
1.3.2 Objetivos Específicos	9
1.4 Estructura de la Tesis	10
<b>CAPÍTULO 2. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS, MORFOLÓGICAS Y BIOGEOQUÍMICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO</b>	<b>13</b>
2.1 Forzamientos mareales y submareales principales	14
2.1.1 Datos Observados	14
2.2 Clasificación hidrodinámica del Estuario del Río Valdivia	19
2.3 Geomorfología	20
2.3.1 Especies vegetales	21
2.3.2 Aporte de sedimentos	22
2.4 Características sismológicas	23
<b>CAPÍTULO 3. EVOLUCIÓN DEL INTERÉS CIENTÍFICO POR EL USO Y LA GESTIÓN DEL SUELO EN LAS CIUDADES COSTERAS: CENTRADO EN HUMEDALES</b>	<b>27</b>
3.1 El desarrollo urbano en zonas costeras	27
3.2 Metodología para el análisis bibliográfico	29
3.2.1 Análisis bibliométrico	30
3.2.2 Mapeo científico	31
3.3 Resultados y discusión	32
3.3.1 Revisión del análisis bibliométrico por unidad de rendimiento	32
3.3.2 Análisis del mapeo científico	36
3.3.3 Trabajos de investigación y red temática según el tipo de costa	47
3.3.4 Evolución de los estudios sobre humedales	51
<b>CAPÍTULO 4. RESPUESTA DEL HUMEDAL MICROMAREAL DEL RÍO VALDIVIA A LA SUBIDA DEL NIVEL DEL MAR Y AL HUNDIMIENTO POR TERREMOTOS</b>	<b>58</b>
4.1 Materiales y métodos	60
4.1.1 Área de aplicación del modelo	60
4.1.2 Marea astronómica	61
4.1.3 Aumento relativo del nivel del mar	61
4.2 Modelo idealizado de elevación de la marisma	62
4.3 Generación de series de subsidencia del terreno	65

---

<b>4.4</b>	<b>Desarrollo probabilístico</b>	<b>68</b>
<b>4.5</b>	<b>Resultados y discusión</b>	<b>68</b>
4.5.1	Altura del humedal con R variable y sin sismos (1985-2018)	68
4.5.2	Altura del humedal incorporando la subsidencia del sismo de 2010 (1985-2018)	69
4.5.3	Generación aleatoria de sismos para una línea temporal de 100 años en la zona de estudio.	70
 <b>CAPÍTULO 5. PROYECCIÓN DE LOS EFECTOS DE LA SUBIDA RELATIVA DEL NIVEL MEDIO DEL MAR SOBRE LA PLANIFICACIÓN URBANA DE UNA CIUDAD</b>		 <b>77</b>
<b>5.1</b>	<b>Metodología</b>	<b>80</b>
5.1.1	Contexto urbano del Área de investigación	80
5.1.2	SLAMM 6.7	80
5.1.3	Obtención de archivos raster	81
5.1.4	Parámetros del modelo	85
5.1.5	Calibración y validación	87
<b>5.2</b>	<b>Resultados y discusión</b>	<b>88</b>
5.2.1	Zona de estudio general	88
5.2.2	Zonas particulares de interés	91
5.2.3	Comportamiento frente a un evento sísmico	98
5.2.4	Medidas de mitigación a efectos de inundación	100
 <b>CAPÍTULO 6. TENDENCIAS EN LA CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDAS RESISTENTES A LAS INUNDACIONES: CASAS ANFIBIAS Y CASAS SOBRE PILOTES</b>		 <b>103</b>
<b>6.1</b>	<b>Materiales y métodos</b>	<b>104</b>
6.1.1	Principales características que debe tener una vivienda para no ser vulnerable a una inundación costera.	105
6.1.2	Tipos de Viviendas Resilientes a inundaciones	105
6.1.3	Modelo experimental	111
<b>6.2</b>	<b>Resultados</b>	<b>114</b>
6.2.1	Análisis Normativo	114
6.2.2	Códigos de construcción europeos	115
6.2.3	Cálculo de pesos para el diseño de soluciones frente a inundaciones	118
6.2.4	Diseño Casa anfibia	120
6.2.5	Diseño Casa palafito	122
<b>6.3</b>	<b>Discusión</b>	<b>125</b>
 <b>CAPÍTULO 7. COMPORTAMIENTO DE SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS DE MADERA FRENTE A LA CONDENSACIÓN INTERSTICIAL EN ZONAS DE ALTA HUMEDAD RELATIVA</b>		 <b>128</b>
<b>7.1</b>	<b>Metodología y Materiales</b>	<b>129</b>
7.1.1	Ubicación de los puntos de medición	129
<b>7.2</b>	<b>Metodología de medición</b>	<b>131</b>
<b>7.3</b>	<b>Soluciones constructivas</b>	<b>132</b>
<b>7.4</b>	<b>Barrera de vapor analizada</b>	<b>133</b>
<b>7.5</b>	<b>Métodos de calculo</b>	<b>134</b>
7.5.1	Cálculo de ocurrencia de condensación intersticial	134

<b>7.6 Resultados y discusiones</b>	<b>136</b>
7.6.1 Temperatura y Humedad Relativa	136
7.6.2 Resultados soluciones sin Barrera de vapor	138
7.6.3 Resultados soluciones con Barrera de Vapor	139
7.6.4 Discusión implementación Barreras de Vapor y alternativas	140
<b>CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>144</b>
<b>Recomendaciones para futuras investigaciones.</b>	<b>150</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.</b>	<b>151</b>

---

## Índice de tablas

Tabla 2-1: Regímenes del ERV caracterizados por sus rangos típicos de marea, velocidades y direcciones del viento y descargas fluviales inferidas a partir de observaciones tomadas entre el 2 de enero de 2012 y el 31 de enero de 2018.	18
Tabla 2-2: Distribución taxonómica de la flora de la reserva (Ramírez et al., 1991).	22
Tabla 3-1: Número de documentos por países y proporción de documentos por población y por km de costa.	34
Tabla 3-2: Diez documentos más citados sobre el tema de estudio, presentados en orden decreciente (30/08/2021).	35
Tabla 3-3: Resumen de los principales estudios por periodos y zona costera	49
Tabla 4-1: Escenarios básicos (IPCC, 2021).	61
Tabla 4-2: Ventanas temporales por magnitud de sismos en la región de los ríos producto de movimientos interplaca.	66
Tabla 4-3: Registros de subsidencias de dos eventos sísmicos en la ciudad de Valdivia.	67
Tabla 5-1: Clasificación de humedales de la zona de estudio	84
Tabla 5-2: Clasificación de marismas, extracto del documento técnico de SLAMM6.7.	84
Tabla 5-3: Atributos del área de estudio ingresados al software.	85
Tabla 5-4: Proyecciones a año 2030 de usos del suelo.	89
Tabla 5-5: Resultados proyecciones año 2050	90
Tabla 5-6: Resultados de las proyecciones a año 2100.	90
Tabla 6-1: Comparativa de los aspectos más importantes de cada una de las normas:	116
Tabla 6-2: Pesos de la superestructura y elementos secundarios para cada vivienda	118
Tabla 6-3: Comparación entre viviendas anfibas y palafitos:	125
Tabla 7-1: Características de ubicaciones medidas	130
Tabla 7-2: Características generales Barrera de Vapor	133
Tabla 7-3: Características de difusión de vapor de Barrera de Vapor	134
Tabla 7-4: Promedio de temperaturas y humedad relativa mes de agosto 2022	137
Tabla 7-5: Características difusión de vapor Barrera de Vapor hipotética	141
Tabla 7-6: Características difusión de vapor Barrera de Vapor Papel Kraft	142

---

## Índice de figuras

Figura 1-1: Mapa de localización del estuario del Río Valdivia.	8
Figura 2-1: Mapa de ubicación del ERV (panel a) y su contexto geográfico (panel b); el rectángulo punteado muestra la sección del estuario analizada, desde la desembocadura de la bahía de Corral hasta la ciudad de Valdivia, la estación meteorológica de la UACH con un cuadrado verde y el mareógrafo con un triángulo azul. El medidor de caudal del río en el círculo amarillo está 40 km aguas arriba, al NE de la ciudad de Valdivia.	14
Figura 2-2 (a) Función de densidad de probabilidad, (b) Función de densidad de probabilidad acumulada para los datos de descarga del río ERV. Umbrales de los regímenes Exceptional Dry (E-D), Normal (N), Extreme (Ex) y Exceptional Rainy (E-R)	17
Figura 2-3: Rosa de los vientos en la zona de estudio.	18
Figura 2-4: Diagrama de circulación-estratificación, adaptado de Geyer & MacCready (2014). El área en azul muestra la variabilidad estimada del ERV. Las líneas azules representan la ubicación de los regímenes según su $Fr_r$ , y las líneas rojas muestran el parámetro de mezcla para las mareas vivas y muertas. Los círculos muestran las condiciones de la campaña realizada por Giesecke et al., (2017); en rojo están los datos de abril de 2014, y en amarillo los de enero de 2015.	20
Figura 2-5: A. <i>Scirpus californicus</i> ; B. <i>Egeria densa</i> ; y C. <i>Juncus procerus</i>	21
Figura 2-6: Ubicación zona de estudio en río Cruces y estaciones de monitoreo, en sistema de coordenadas UTM-WGS84, Huso 18S. Se muestran las estaciones D1-2 de medición de Co y los mareógrafos de la bahía de Corral y Las Mulatas	23
Figura 2-7: Mapa de características geotectónicas de Valdivia. (Alvarado et al., 2019)	25
Figura 3-1: Ejemplos de ciudades costeras vinculadas a diferentes ambientes: (a) descubierta al mar; (b) Estuario; y (c) Humedal.	29
Figura 3-2: Relación entre los dos macrogrupos de búsqueda y los tipos de costa.	30
Figura 3-3: Diagrama de selección de trabajos de investigación.	31
Figura 3-4: Diagrama de flujo de PRISMA: (a) diagrama estratégico; (b) mapa de evolución. Basado en (M. Cobo et al., 2012).	32
Figura 2-5: Distribución temporal de los estudios publicados por año.	33
Figura 3-6: Mapa de la evolución temática de la investigación por periodos.	38
Figura 3-7: Diagramas estratégicos y cluster correspondientes al P1 1987 - 2013.	40
Figura 3-8: Diagramas estratégicos y cluster correspondientes al P2 2014 - 2017.	42
Figura 3-9: Diagramas estratégicos y cluster correspondientes al P3 2018 - 2019.	44
Figura 3-10: Diagramas estratégicos y cluster correspondientes al P4 2020.	46
Figura 3-11: Resumen de las tendencias de la investigación en toda la serie cronológica de trabajos sobre el uso y la gestión del suelo en ciudades costeras, centrándose en las zonas húmedas. A: Interacción humedal-ciudad; B: Interacción ciudad-costa y C: Interacción humedal-costa-ciudad.	52
Figura 3-12: Estrategias de control de inundaciones por SLR en humedales y su relación coste-beneficio de 10.	54
Figura 4-2: Proyección de la variación del nivel medio del mar, del escenario SSP2-4.5 entre el año 2020 y 2100.	62
Figura 4-3: Bosquejo de los flujos de sedimentos en la superficie de la marisma. Adaptado de (Marani et al., 2010)	63
Figura 4-4: Panel (a), Ejemplo de una simulación de terremotos probables en 100 años, panel (b), Subsistencia sísmica asociada a los terremotos del panel a.	68
Figura 4-5: Variación de la altura del humedal del río Cruces, en el periodo 1985-2018, considerando solo la variación de R.	69
Figura 4-6: Variación de la altura del humedal del río Cruces, en el periodo 1985-2018, considerando la variación de R, y la subsidencia promedio del terremoto de 2010.	70

Figura 4-7: Variados resultados para tres simulaciones del programa (a) variación del nivel medio para escenario SSP2-4.5, (b) altura del humedal sin considerar subsidencias, (c) subsidencias simulación N° 1, (d) altura del humedal considerando subsidencias de simulación N°1, (e) subsidencias simulación N° 2, (f) altura del humedal considerando subsidencias de simulación N°2, (g) subsidencias simulación N° 3, (h) altura del humedal considerando subsidencias de simulación N°3	71
Figura 4-8: Proyección de la altura del humedal máxima, mínima, mediana y cuartiles 25-75, de 100 años. para 20000 simulaciones.	73
Figura 4-9: (a) Función de distribución de probabilidad de la proyección de la altura del humedal para los años 2040, 2060, 2080 y 2100. Histogramas de la proyección de la altura normalizada del humedal para los años (b) 2040, (c) 2060, (d) 2080, (e) 2100. Todas para 20 mil simulaciones.	74
Figura 5-2: Archivo raster representado en 2D	81
Figura 5-3: Fuentes para elaboración de archivo DEM.	82
Figura 5-4: Mapa de DEM.	83
Figura 5-5: Mapa de pendientes (SLOPE).	83
Figura 5-6: A la izquierda mapa raster de uso de suelo en escala de grises, a la derecha el mapa raster en formato polígono con la identificación de cada área.	85
Figura 5-7: Escenarios de aumento del nivel del mar.	87
Figura 5-8: Calibración del modelo. (a) Condición inicial y (b) Año "0".	87
Figura 5-9: Comparación entre (a) simulación de validación y (b) cobertura de suelo año 2022.	88
Figura 5-10: Comparación entre (a) cobertura de suelo año 2022 y (b) Mapa de predicción de cambio de uso de suelos para el año 2030 para el escenario SPP2.45.	89
Figura 5-11: Comparación entre (a) cobertura de suelo año 2022 y (b) Mapa de predicción de cambio de uso de suelos para el año 2050 para el escenario SPP2.45.	90
Figura 5-12: Comparación entre (a) cobertura de suelo año 2022 y (b) Mapa de predicción de cambio de uso de suelos para el año 2100 para el escenario SPP2-4.5.	91
Figura 5-13: Zonas de interés a analizar, zona 1: Borde sur sector Angachilla, zona 2: Teja Sur y zona 3: sector Las Mulatas.	92
Figura 5-14: Cambio de cobertura de suelo zona 1 (Borde sur sector Angachilla en confluencia del río Valdivia con río Tornagaleones) para el escenario SSP2-4.5.	93
Figura 5-15: Cambio de cobertura de suelo zona 2 (sector Teja Sur) para el escenario SSP2-4.5	94
Figura 5-16: Cambio de cobertura de suelo en el tiempo para el año 2030 considerando el escenario SSP2-4.5.	95
Figura 5-17: Plan Regulador Comunal de Valdivia en el área de estudio. Fuente: Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU, 2021)	95
Figura 5-18: Ejemplo cambios ribera sector camino a Niebla (borde noroeste del río Valdivia).	96
Figura 5-19: Ribera oeste comprendida entre avenida Siete y Torobayo (borde oeste).	97
Figura 5-20: Extracto microzonificación sísmica. Fuente: (Alvarado, 2018).	99
Figura 5-21: Comparación entre simulaciones al año 2100 entre caso sin sismo y casos con sismo de 6,9 Mw y 9,5 Mw	99
Figura 6-1: Propuesta de vivienda y estructura flotante, adaptada de (M.V. & Philip, 2022)	107
Figura 6-2: Soluciones constructivas para muros perimetrales.	112
Figura 6-3: Solución constructiva para techumbre	113
Figura 6-4: Solución constructiva para piso	114
Figura 6-5: Planos 2D y elevación de la casa propuesta	114
Figura 6-6: Disposición de los tubos de fibra de vidrio, tanto en planta como en vista alzada.	120
Figura 6-7: (a) Esquema de tipo de zapata aislada y sus dimensiones propuestas. (b) Distribución de zapatas aisladas bajo la superficie de la casa anfibia.	121
Figura 6-8: Ejemplo de anclaje y deslizamiento de los postes guías a la estructura flotante de la casa (Adaptado de (Nekooie et al., 2017)).	122

Figura 6-9: Distribución de pilotes y detalle de pilote de madera a instalar	123
Figura 7-1: Ubicaciones puntos de medición	130
Figura 7-2: Sensor HOBO para medir la humedad relativa y temperatura (a) y aplicación para control de datos (b)	131
Figura 7-3: Instalación sensor HOBO en U4	132
Figura 7-4: Soluciones constructivas bajo estudio: $\rho$ – densidad; e- espesor; $\lambda$ - conductividad térmica y $\mu$ -factor de resistencia a la difusión de vapor.	133
Figura 7-5: Temperatura y Humedad relativa exterior por hora desde mayo hasta agosto	137
Figura 7-6: Porcentaje de condensación intersticial durante mes de agosto 2022.	138
Figura 7-7: Perfil de presión de vapor de agua interior de M3 en U1, U3, U4 y U7 el día 9 de agosto a las 00:00 horas	139
Figura 7-8: Porcentaje de condensación intersticial durante mes de agosto 2022 con barrera de vapor	140
Figura 7-9: Porcentaje de condensación intersticial durante mes de agosto 2022 con 50% de humedad relativa interna y barrera de vapor hipotética	141
Figura 7-10: Porcentaje de condensación intersticial durante mes de agosto 2022 con 50% de humedad relativa interna y barrera de vapor Papel Kraft	142

## **Resumen.**

La tesis aborda la importancia del desarrollo urbano en zonas costeras y la necesidad de políticas, estrategias y planes de adaptación debido a la crisis climática y los cambios en el nivel medio relativo del mar. Se analiza la evolución del concepto de gestión del uso del suelo en ciudades costeras a través de una revisión de registros bibliográficos y un análisis bibliométrico. Se destaca la necesidad de explorar modelos de gestión adaptativa a la nueva realidad climática para reducir el riesgo de inundaciones a largo plazo.

Un sistema estuarino prototipo en el que aplicar esta metodología de gestión es el que se encuentra en torno a la ciudad de Valdivia (Chile), que destaca por su importancia en la dinámica económica de la región y su riqueza en especies vegetales y animales. Dentro de los estudios realizados en la presente tesis, se determina la respuesta del humedal frente a los cambios proyectados en el nivel medio del mar, las alteraciones en las concentraciones de sedimentos en suspensión y los efectos de la subsidencia sísmica local. Se espera que la tasa de subida relativa del nivel del mar afecte directamente a la altura de equilibrio a la que está sometido el humedal y se destaca la importancia de la vegetación existente para controlar esta altura de equilibrio. También se investiga el impacto de la subida del nivel del mar en el cambio de los humedales del estuario del río Valdivia para modelar los cambios de la cubierta terrestre debido al aumento a largo plazo del nivel del mar sobre humedales y zonas costeras, para ajustar el plano regulador territorial, observándose que las principales fluctuaciones en el uso del suelo, están presentes en las marismas de inundación irregular y en las marismas de inundación regular, siendo estas últimas las que muestran un mayor aumento de superficie.

Por otra parte, se discute la importancia de la resiliencia urbana en la adaptación al cambio climático, enfocándose en la transformación de las estructuras políticas y económicas para abordar las desigualdades sociales y económicas que hacen que algunas comunidades sean más vulnerables que otras. Se identifican y desarrollan las características que debe tener una vivienda para no ser vulnerable a una inundación costera, empleando tanto la normativa europea como americana y se destacan los tipos de viviendas resilientes a inundaciones, como las casas anfibas y de pilotes. Además, se considera la implementación de barreras de vapor que ayuden a controlar humedad intersticial, responsable de provocar una serie de enfermedades

---

respiratorias en viviendas cercanas a zonas húmedas, utilizando la normativa internacional ISO13788.

Finalmente, el análisis de trabajos publicados sobre LUM-CC muestra que el riesgo de inundación debido a la subida del nivel medio del mar es un tema dominante. El Estuario del Río Valdivia presenta estados anuales denominados Normal, Extremo, Excepcionalmente Lluvioso y Seco. Los terremotos pueden generar hundimientos en el suelo, produciendo cambios directos en la altura del humedal. Se hace énfasis en la protección de zonas inundables y la incorporación de medidas de planificación para la creación de programas de Ordenamiento Territorial y Áreas Naturales Protegidas. El gobierno de Chile está considerando la posibilidad de elaborar una normativa para la construcción de casas anfibas. Además, se propone el uso de materiales no convencionales como barrera de vapor, como el Papel Kraft.

---

## **Abstract**

The thesis addresses the importance of urban development in coastal areas and the need for policies, strategies and adaptation plans due to the climate crisis and changes in relative mean sea level. The evolution of the concept of land use management in coastal cities is analyzed through a review of bibliographic records and a bibliometric analysis. The need to explore adaptive management models to the new climatic reality to reduce long-term flood risk is highlighted.

A prototype estuarine system in which to apply this management methodology is the one around the city of Valdivia (Chile), which stands out for its importance in the economic dynamics of the region and its richness in plant and animal species. Within the studies carried out in this thesis, the response of the wetland to projected changes in mean sea level, alterations in suspended sediment concentrations and the effects of local seismic subsidence are determined. The rate of relative sea level rise is expected to directly affect the equilibrium height to which the wetland is subjected and the importance of existing vegetation in controlling this equilibrium height is highlighted. The impact of sea level rise on wetland change in the Valdivia River estuary is also investigated to model land cover changes due to long-term sea level rise over wetlands and coastal areas, to adjust the territorial regulatory plan, noting that the main fluctuations in land use, are present in the irregular flood marshes and in the regular flood marshes, the latter showing the greatest increase in surface area.

On the other hand, the importance of urban resilience in climate change adaptation is discussed, focusing on the transformation of political and economic structures to address the social and economic inequalities that make some communities more vulnerable than others. It identifies and develops the characteristics that a dwelling must have in order not to be vulnerable to coastal flooding, using both European and American standards, and highlights flood resilient housing types such as amphibious and stilt houses. In addition, the implementation of vapor barriers that help control interstitial moisture, responsible for causing a number of respiratory diseases in dwellings near wet areas, is considered, using the international standard ISO13788.

Finally, the analysis of published works on LUM-CC shows that the risk of flooding due to mean sea level rise is a dominant issue. The Valdivia River Estuary presents annual states called Normal, Extreme, Exceptionally Rainy and Dry. Earthquakes can generate subsidence in the soil, producing direct changes in the height of the wetland.

---

Emphasis is placed on the protection of flood zones and the incorporation of planning measures for the creation of land-use planning programs and Natural Protected Areas. The Chilean government is considering the possibility of developing regulations for the construction of amphibious houses. In addition, the use of non-conventional materials as a vapor barrier, such as Kraft paper, is proposed.

---

# Capítulo 1. Introducción, Motivación y Objetivos

## 1.1 Introducción

A lo largo del tiempo los planos urbanísticos han evolucionado a un ritmo distinto al de las necesidades humanas y ambientales de las ciudades. En muchas ocasiones, estos planos ya están obsoletos y son demasiado rígidos para abordar los problemas de diseño urbano en relación al espacio público y la vivienda antes de ser implementados (Pérez Lancellotti, 2014).

Según algunos autores, como Akasaka et al., (2009); Rimer et al., (1978); Shi et al., (2017), existe una conexión directa entre el uso sostenible de la tierra y la planificación del paisaje. El paisaje puede ser utilizado para mejorar la calidad del agua del entorno, ya que las características del paisaje están relacionadas con la calidad del agua. Por lo tanto, un buen planeamiento del paisaje puede prevenir la posible contaminación del agua en las cuencas adyacentes. Es importante proporcionar directrices precisas para la planificación del uso de suelos con este fin (Shi et al., 2017).

Los estudios relacionados con la ocupación urbana en las regiones costeras son de gran interés, ya que cerca del 40% de la población mundial vive en zonas costeras (Golberg, 1994; ONU, 2017). Debido a este desarrollo de las ciudades, estas se convierten en puntos de crecimiento para las comunidades vecinas, lo que implica la utilización de un territorio más amplio. Este fenómeno es especialmente relevante en las zonas costeras, donde el área de influencia se extiende tanto por la tierra como por la zona intermareal y marina. En este sentido, existen diversos casos de planificación costera como la laguna de Venecia (Pirazzoli, 1991), el puerto de Rotterdam (Degrieck et al., 2006), Shanghái (Cheng et al., 2018) y la ciudad de Nueva York (Kim, 2020a), entre otros, en los que se ha favorecido el desarrollo industrial, pesquero y turístico por sobre el ecosistema. Por otro lado, el desarrollo urbano en zonas de humedales y pantanos puede tener efectos negativos sobre la calidad del agua, aparte de los riesgos en la propia edificación. Estos ecosistemas actúan como filtros naturales que purifican el agua, eliminando los contaminantes y los nutrientes en exceso. La urbanización puede introducir contaminantes y nutrientes en estas zonas, lo que puede afectar negativamente la calidad del agua (Able, 2005).

En cuanto al estudio urbano en zonas de estuarios intermareales dentro de América Latina, se han llevado a cabo investigaciones relevantes como "Estuarios de América Latina: Un marco para el desarrollo sostenible" y Estuarios de América Latina: Guía para el desarrollo sostenible desarrollados por el Banco Mundial y Las Naciones Unidas respectivamente ( World Bank, 2002; ONU, 2017). En ellos, se constató que el desarrollo urbano en los estuarios estaba teniendo un impacto negativo en el medio ambiente. Por lo que era necesario un desarrollo sostenible en la que la planificación urbana podría desempeñar un papel en la protección y gestión de estos importantes ecosistemas (World Bank, 2002). Por otra parte, el estudio de UNEP, (2009), estableció que la planificación urbana podía desempeñar varias funciones en la protección y gestión de los estuarios, entre ellas: regular el uso del suelo, desarrollo de infraestructuras, promover la educación y la concienciación del público.

Esto es relevante para planificación inmobiliaria, desde la década de los sesenta, la evaluación del comportamiento de los edificios y su medio ambiente han generado un importante volumen de investigación (Cole, 1998). Sin embargo, no fue hasta la década de los noventa que el sector de la construcción comenzó a reconocer el importante impacto de sus actividades sobre su entorno (Haapio & Viitaniemi, 2008) y, sobre todo, sobre el bienestar en las ciudades (Macías & García Navarro, 2010). Además, se puede decir, que la construcción es uno de los principales factores que aceleran el cambio climático (de Klijn-Chevalerias & Javed, 2017).

En Chile, todos los antecedentes técnicos y ambientales son vitales para el desarrollo urbanístico en zonas húmedas, esto debido que la legislación vigente estipula que los dueños de predios que desean edificar en sus propiedades, con independencia de la envergadura de la obra, deben someterse a los procesos administrativos reglamentados en el Decreto Ley N°47, del 5 de junio de 1992, Ordenanza General de la Ley General de Urbanismo y Construcción (OGUC), el cual en múltiples ocasiones no considera la importancia biológica, actual o futura, del territorio a urbanizar. Por este motivo, sólo cuando se inician el proceso constructivo los propietarios se enteran de que sus inmuebles están emplazados en "zonas de riesgo". Esto es más común de lo que se piensa y afecta principalmente a propietarios cuyos inmuebles se ubican al borde de ríos, esteros antiguas marismas y humedales desecados. Por este motivo se dicta en este país, la nueva ley para la protección de humedales urbanos, la ley 21.202, que pretende modificar cuerpos legales existentes con el fin de proteger los ecosistemas que guardan tanta importancia ecológica. La ley 21.202 del Ministerio de Medio Ambiente se conoce por ser la primera ley en Chile que pretende proteger a los

humedales urbanos y fue creada a petición de la ciudadanía para conservar los espacios de recreación y cultura de ciudades como Valdivia (Ministerio de Medio Ambiente, 2020).

El planeamiento urbano es una disciplina que se encarga de diseñar y gestionar el desarrollo de las ciudades, teniendo en cuenta aspectos como la vivienda, el transporte, el medio ambiente y la infraestructura. Sin embargo, en los últimos años, el cambio climático ha planteado nuevos desafíos para el planeamiento urbano, en particular en relación a las inundaciones costeras (Barragan & de Andres, 2016). Las inundaciones costeras son un peligro cada vez más frecuente debido al aumento del nivel del mar y a la intensificación de los eventos climáticos extremos. Estas inundaciones pueden tener graves consecuencias para las personas y las infraestructuras de las zonas costeras, por lo que es necesario que el planeamiento urbano tenga en cuenta estos riesgos (Halls & Magolan, 2019). Una de las principales implicancias del cambio climático y las inundaciones costeras para el planeamiento urbano es la necesidad de crear estrategias de adaptación y mitigación (Mueller et al., 2018). Esto implica la identificación de zonas vulnerables a las inundaciones, la planificación de infraestructuras y edificios resistentes a las inundaciones, y la creación de planes de emergencia para situaciones de inundación (Chang et al., 2021). Otro aspecto importante del planeamiento urbano en relación al cambio climático es la necesidad de promover un desarrollo urbano sostenible. Esto implica la planificación de ciudades más compactas y eficientes en términos energéticos, la promoción del transporte público y la reducción del uso del automóvil, y la creación de espacios verdes que ayuden a mitigar los efectos del cambio climático (Verichev et al., 2021).

En relación a la respuesta de infraestructuras ante eventos extremos, es importante señalar, que las últimas 4 décadas, muestran una intensificación de los eventos extremos, debido al cambio climático progresivo (R. Nicholls, 2011). Además de que se ha comprobado una conexión entre el uso del suelo, el desarrollo de los humedales urbanos y su relación con la zona ribereña, todo ello dentro de las zonas de desarrollo costero (Sallenger et al., 2012). Además los trabajos en esta materia indican por un lado que los eventos extremos (cada vez más frecuentes en el planeta), el aumento sostenido del nivel medio global del mar, generan serias implicancias sobre el desarrollo urbano costero (Ruiz-Luna & Berlanga-Robles, 2003). El primero de los cuales requiere una mayor protección urbana y los problemas económicos generados por una inadecuada preparación ante eventos extremos (R. J. Nicholls & Hoozemans, 1996), y los impactos sobre la sostenibilidad (urbano-humedal), en aspectos como la

calidad del agua y del aire (Gracia et al., 2018; Zhu & Zeng, 2018). Por otro lado, el aumento del nivel medio global del mar, al ser una condición sistemática del planeta, provoca la necesidad de adaptación en las ciudades costeras (urbano-costero), como cambios en los códigos y normativas de construcción, creación de zonas de protección, humedales artificiales, etc. (Du et al., 2020; Y. Zhang et al., 2020).

En este sentido, el desarrollo urbano en humedales y pantanos puede tener graves consecuencias ecológicas, ya que estos ecosistemas son muy sensibles a la alteración del equilibrio natural (Able, 2005). Los humedales y pantanos son importantes ecosistemas que proporcionan una gran cantidad de servicios ambientales, como la regulación del clima, la purificación del agua y la protección contra inundaciones, sin embargo, el desarrollo urbano en estas zonas puede tener efectos negativos sobre estos ecosistemas (R. J. Nicholls & Hoozemans, 1996). Uno de los principales peligros del desarrollo urbano en zonas de humedales y pantanos es la pérdida de hábitat para la fauna y flora nativas. Estos ecosistemas son hogar de una gran variedad de especies, muchas de las cuales son endémicas y no se encuentran en ningún otro lugar del mundo. La urbanización puede alterar o destruir estos hábitats, lo que puede llevar a la extinción de especies enteras (D'Alpaos et al., 2011). Otro peligro del desarrollo urbano en estas zonas es la alteración del ciclo hidrológico. Los humedales y pantanos son importantes reguladores del agua, ya que actúan como esponjas que absorben y retienen el agua durante los períodos de lluvia y liberan lentamente el agua durante los períodos de sequía (Pirazzoli, 1991). La urbanización puede alterar este ciclo hidrológico, lo que puede llevar a inundaciones y sequías (Morris et al., 2002).

Las infraestructuras de viviendas contiguas a zonas de humedales pueden verse afectadas por los cambios en las variables físicas y biogeoquímicas que se producen en los cuerpos de agua cercanos (Sithole, 2012). Estos cambios pueden ser causados por actuaciones antropogénicas y/o geofísicas, y pueden tener efectos a corto, medio y largo plazo (Arnell & Gosling, 2016). A corto plazo, las infraestructuras de viviendas contiguas a zonas de humedales pueden verse afectadas por las inundaciones que pueden ocurrir en estas áreas. Los humedales actúan como esponjas que absorben y retienen el agua durante los períodos de lluvia, liberándola lentamente durante los períodos de sequía (English et al., 2021). Sin embargo, la urbanización puede alterar este ciclo hidrológico, lo que puede llevar a inundaciones en épocas de lluvia. Estas inundaciones pueden causar daños en las infraestructuras de viviendas, como inundaciones en sótanos y garajes (Abadie et al., 2020). A medio plazo, las

infraestructuras de viviendas contiguas a zonas de humedales pueden verse afectadas por la pérdida de hábitat para la fauna y flora nativas. Los humedales son hogar de una gran variedad de especies, muchas de las cuales son endémicas y no se encuentran en ningún otro lugar del mundo (Ellis et al., 2011). A largo plazo, las infraestructuras de viviendas contiguas a zonas de humedales pueden verse afectadas por la alteración del ciclo hidrológico y la calidad del agua en estas zonas. La urbanización puede alterar el ciclo hidrológico de los humedales, lo que puede llevar a inundaciones en épocas de lluvia y sequías en épocas de sequía (Mannucci et al., 2022). Además, la urbanización puede introducir contaminantes y nutrientes en estas zonas, lo que puede afectar negativamente la calidad del agua a largo plazo (Duan et al., 2016a).

Es por esto, que todo desarrollo urbano y habitacional que implique la intervención de áreas húmedas debe estar sometida a evaluaciones de impacto ambiental ya que estos ecosistemas son muy importantes por su papel crucial en la regulación del ciclo del agua y en la conservación de la biodiversidad. Además de almacenar grandes cantidades de carbono, lo que los convierte en importantes sumideros de CO<sub>2</sub> (Gracia et al., 2018). Por esto, las recomendaciones constructivas para las viviendas, deben evitar tanto fallos ambientales como estructurales, tanto de las mismas como de sus entornos, ya que se pueden evitar enfermedades transmitidas por el agua (Sithole, 2012). Así mismo, de acuerdo con la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias de EE. UU. y el Consejo de Diseño de la Construcción de Canadá, para que una vivienda sea menos vulnerable a una inundación costera, debe tener ciertas características (American Society of Civil Engineers, 2014; Coulbourne et al., 2021). Algunas de las principales características son: altura que permita ventilación, diseño adecuado, sistema de drenaje que permitan que el agua fluya lejos de la casa, una correcta ubicación para evitar que el agua se acumule alrededor de la vivienda y finalmente materiales de construcción resistentes al agua y al viento.

En este sentido, las variables a controlar, una de las más relevantes, es la humedad al interior de cada establecimiento. Los estudios realizados por Zhang y Yoshino (H. Zhang & Yoshino, 2010) han indicado que la humedad al interior de una edificación está estrechamente relacionada con problemas de salud, consumo de energía y la durabilidad de la envolvente en la construcción. Los estudios realizados dentro del continente europeo (Leonowicz, 2020), que el daño de la humedad en la estructura de una construcción corresponde al 48.3% del total de los daños, por lo que se necesitan soluciones constructiva a lo largo de los años, las cuales pueden contemplar:

Membranas impermeabilizantes: se utilizan para proteger superficies de la humedad y filtraciones. Pueden ser de diferentes materiales, como asfalto modificado, PVC o caucho. Aislamiento de espuma rígida: este tipo de aislamiento es resistente a la humedad y puede ser utilizado como barrera de vapor. Se puede encontrar en diferentes densidades y espesores. Paneles de yeso con núcleo de fibra de vidrio: estos paneles son resistentes a la humedad y al moho, lo que los hace ideales para áreas húmedas como baños o cocinas. Pinturas con propiedades impermeabilizantes: hay pinturas que contienen aditivos especiales que les permiten actuar como barreras de vapor y prevenir la humedad. Es importante tener en cuenta que la elección de los materiales dependerá del tipo de construcción y las condiciones específicas del lugar donde se va a construir.

## 1.2 Motivación

El campo de estudio relacionado con la planificación de uso de suelos contiguos a estuarios, humedales y ríos no está muy desarrollado en Chile, y solo existen análisis relacionados a una temática paisajística y urbana, pero no de un impacto ambiental e hidrodinámico de estos cuerpos de agua frente a la realidad urbana e inmobiliaria.

En el caso de los terrenos aledaños a ríos, esteros o posibles escurrimientos provenientes de quebradas, el organismo que tiene la responsabilidad de analizar estos estudios es la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) del Ministerio de Obras Públicas (MOP). El mismo MOP informa en su sitio web que la DOH es “la entidad a cargo de revisar estudios técnicos y autorizar la definición o disminución de las Franjas de Restricción, asociadas a crecidas de los cauces de ríos, esteros y quebradas que afectan a una propiedad, de acuerdo con el Plan Regulador comunal” (MOP, 2023)

Lo anterior se contrapone con una particular y taxativa restricción contenida en el artículo N° 97 de la Ley Orgánica del MOP: “Se prohíbe construir casas para viviendas y con mayor razón formar poblaciones en suelos periódicamente inundables, aun cuando la inundación se presente en períodos de hasta diez años” (Gobierno de Chile, 2014). Esta prohibición sencillamente anula la supuesta facultad de la DOH para definir o disminuir las franjas de restricción cuando se trata de autorizar proyectos de viviendas.

Por este motivo, y para entregar mejores herramientas de planificación a los gestores, es importante desarrollar un análisis de la evolución de los terrenos contiguos a los

cuerpos de agua y determinar cómo afectaría un cambio en sus variables físicas y biogeoquímicas a corto, medio y largo plazo, a las zonas húmedas que interactúan con el desarrollo urbano, considerando información satelital y comportamiento hidrodinámico de estos sistemas.

Para ello es fundamental, iniciar la investigación con estudios hidrodinámicos y de clasificación. Estos estudios son escasos en Chile, dentro de los trabajos relacionados con la clasificación de la circulación estuarina encontramos el documento titulado “Estuarios y Lagunas costeras: ecosistemas importantes del Chile central” hace una descripción de los principales estuarios de este país (Stuardo, José; Valdovinos, 1989). Luego aparecen algunas investigaciones relacionadas a la caracterización hidrográfica de estuario Aconcagua (Cortez & Martínez, 2007). Además de estas investigaciones, se han realizado otros trabajos vinculados los estuarios del Río Lebu y Toltén (Aguado, 2013). En cuanto a la caracterización hidráulica del estuario del Río Valdivia, se disponen de dos trabajos relevantes desarrollos gracias a informaciones obtenidas en campañas de campo, tanto de estaciones fijas como también de cruceros a lo largo del eje del canal de navegación, estas son Pino, Mario; Perillo & Santamarina, (1994) y el estudio de Garcés-Vargas et al., (2013) y Garcia et al., (2021).

En resumen, es necesario realizar más investigaciones sobre el impacto ambiental e hidrodinámico de la planificación del uso del suelo adyacente a estuarios, humedales y ríos en Chile. Esta investigación ayudaría a desarrollar mejores herramientas de planificación para los gestores y a proteger estos importantes ecosistemas.

La ubicación geográfica de la ciudad de Valdivia (Figura 1-1), en el sur austral de Chile, se caracteriza por una importante cantidad de estuarios, ríos y zonas húmedas. Por este motivo, se selecciona esta ciudad como caso de estudio para evaluar la dinámica urbana con su entorno, la cual habitualmente no se integra adecuadamente con el territorio.



**Figura 1-1: Mapa de localización del estuario del Río Valdivia.**

Con la información geofísica, ambiental e hidráulica se desarrollarán modelos numéricos que permitan integrar los futuros escenarios climáticos, permitiendo generar un nuevo mapa de usos de suelos costeros que facilitará la gestión urbanística, tanto a nivel inmobiliario como también de las obras civiles necesarias para el desarrollo de la ciudad.

Este análisis local sobre el estuario del río Valdivia, podrá ser extrapolado a otros estuarios de características similares, tanto dentro de Chile, como el estuario de Lebu, río Bueno, Aconcagua, entre otros, como también en otras zonas del mundo donde los regímenes sean similares.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 *Objetivo General*

El objetivo principal de este estudio es evaluar la influencia en edificios e infraestructuras de obras civiles, contiguas a zonas húmedas, debido a variaciones en los forzamientos físicos y biogeoquímicos a corto, medio y largo plazo de los cuerpos de agua, por actuaciones antropogénicas y/o geofísicas. Para lograr esto, se utilizarán modelos numéricos para cuantificar y analizar los impactos de estos cambios.

### 1.3.2 *Objetivos Específicos*

- Analizar los principales artículos científicos vinculados a esta temática y la evolución del estado del arte en las últimas décadas, para identificar oportunidades en el conocimiento científico actual.
- Estudiar los principales forzamientos que afectan a la hidrodinámica del estuario del río Valdivia contiguo a la ciudad y por consiguiente a su dinámica urbana.
- Realizar una serie de modelos idealizados del área de estudio para evaluar los principales parámetros que afectan a su urbanización.
- Implementar un modelo complejo, que permita el análisis de la evolución de los terrenos contiguos a este cuerpo de agua, considerando información satelital y comportamiento hidrodinámico de estos sistemas.
- Construir un mapa de usos de suelos costeros, que integre los futuros escenarios climáticos, que facilitará la gestión urbanística.
- Desarrollar soluciones constructivas resilientes que puedan adaptarse a la nueva realidad climática, tanto en su composición, como en sus materiales de construcción.

## 1.4 Estructura de la Tesis

La tesis está estructurada en siete capítulos, ordenados según un proceso lógico de desarrollo en función de los objetivos de la investigación.

El **capítulo uno**, recoge la descripción del contexto, objetivos, alcance y estructura de esta tesis.

El **capítulo dos**, detalla las características del área de estudio, que se extiende desde la bahía de Corral hasta la ciudad de Valdivia en Chile y su sistema fluvial, destacando todas sus características climáticas, geográficas e hidrológicas.

El **capítulo tres**, analiza la evolución de las contribuciones científicas en la gestión del uso del suelo en zonas costeras y su relación con la crisis climática y la subida del nivel del mar, a través de una revisión bibliográfica y un análisis bibliométrico.

El **capítulo cuatro**, aborda de pérdida de humedales debido al cambio climático, centrándose en el humedal del río Cruces, en Valdivia. Se presenta un modelo para predecir cómo los cambios en el nivel del mar, la concentración de sedimentos y la actividad sísmica podrían afectar al humedal y a las comunidades circundantes.

El **capítulo cinco**, analiza el impacto de la urbanización costera y la subida del nivel del mar en el estuario del Río Valdivia. El estudio utiliza modelos digitales de elevación y el software SLAMM6.7 para evaluar las zonas de inundación bajo diferentes proyecciones de aumento del nivel del mar y sismos, para los años 2030, 2050 y 2100. Para determinar las implicancias sobre el Plan Regulador Comunal vigente.

El **capítulo seis**, centra su estudio en las soluciones de edificación y planificación constructiva de viviendas, evaluando como la arquitectura residencial puede mitigar el riesgo de inundaciones y las características que debe tener una vivienda para ser menos vulnerable a una inundación costera,

El **capítulo siete**, analiza cómo la alta humedad relativa en la ambiente causa condensación de en las paredes de las construcciones, y cómo esto afecta tanto la durabilidad de los materiales y a la salud de sus habitantes, proponiendo soluciones constructivas para evitar esta problemática.

En el **capítulo ocho**, ofrece una perspectiva general de los resultados de la tesis y sintetiza las conclusiones principales de la investigación. Finalmente, se resume la aportación al conocimiento y se incluyen una serie de recomendaciones para futuras investigaciones.



## **Capítulo 2. Características geológicas, morfológicas y biogeoquímicas de la zona de estudio**

La zona sur de Chile (entre 37 y 41°S), que inicia en la provincia de Arauco, pasando por la región de la Araucanía, Los Ríos, Los Lagos y que termina aproximadamente en el Seno de Reloncaví presenta una importante cantidad de estuarios, los que, en conjunto con sus zonas húmedas, conforman un ecosistema rico en múltiples especies vegetales y animales. Uno de los estuarios más destacados corresponde al del Río Valdivia, el cual es de vital importancia en la dinámica económica de la ciudad del mismo nombre.

El estuario del río Valdivia (ERV) (Fig.1) es considerado uno de los más importantes de Chile debido a sus altas tasas de descarga fluvial (Perillo, et al., 1999), que sustenta servicios ecosistémicos claves para especies comerciales (Pardo et al. 2011; Pardo et al., 2012a; 2012b, Vargas et al, 2003). Además, por su cercanía a la ciudad de Valdivia, en la zona se desarrollan un gran número de actividades económicas y recreativas relacionadas con la pesca artesanal, el transporte, el turismo y los deportes náuticos.

El ERV se extiende desde la ciudad de Valdivia hasta la bahía de Corral, en su desembocadura, incluyendo hacia tierra la caleta de San Juan, que está separada de la antigua bahía por la isla Mancera, y los ríos Valdivia y Tornagaleones (Garcés-Vargas et al., 2020). El tramo del estuario estudiado en este trabajo va desde la bahía de Corral hasta el puente Cruces en la ciudad de Valdivia, a unos 14 kilómetros al Este (Figura 2-1).

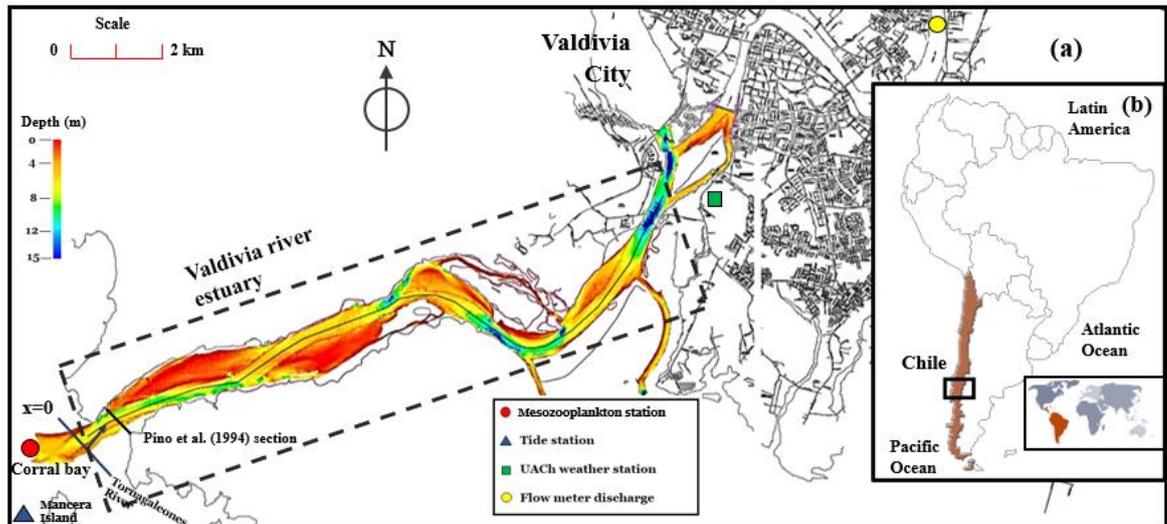


Figura 2-1: Mapa de ubicación del ERV (panel a) y su contexto geográfico (panel b); el rectángulo punteado muestra la sección del estuario analizada, desde la desembocadura de la bahía de Corral hasta la ciudad de Valdivia, la estación meteorológica de la UACH con un cuadrado verde y el mareógrafo con un triángulo azul. El medidor de caudal del río en el círculo amarillo está 40 km aguas arriba, al NE de la ciudad de Valdivia.

La superficie total de la cuenca del río Valdivia se estimó, en el año 2003, en 11.280 km<sup>2</sup>. La profundidad del estuario en su eje central tiene una variación entre 7 y 22 m aproximadamente, siendo más profundo en su desembocadura (Muñoz-Pedrerros, 2003). El ancho medio del canal principal del estuario del río Valdivia es de aproximadamente 700 m y la boca (bahía de Corral) tiene un ancho aproximado de 5 km (Muñoz-Pedrerros, 2003).

## 2.1 Forzamientos mareales y submareales principales

### 2.1.1 Datos Observados

Los registros horarios del nivel medio del mar en la bahía de Corral se obtuvieron de los mareógrafos del Centro Nacional de Datos Hidrográficos y Oceanográficos de Chile (CENDHOC), desde el 7 de abril de 2010 hasta el 7 de diciembre de 2019 (ver ubicaciones en Figura 2-1). Se realizó un análisis armónico de estos datos para identificar los principales constituyentes de marea, de acuerdo a Pawlowicz et al, (2002). La superficie total (St) del estuario es de aproximadamente 13 km<sup>2</sup>.

Los promedios diarios de descarga del río Valdivia (desde el 1 de enero de 2007 al 30 de junio de 2019), medidos en la estación hidrológica "Río Calle Calle- Punpunahe"

(39° 48' 30" S, 72° 54' 17" O) ubicada a 45 km al este de la desembocadura (Fig. 3-1), fueron proporcionados por la Dirección General de Aguas (DGA).

La velocidad ( $m s^{-1}$ ) y dirección (16 direcciones) del viento, medidas cada 30 minutos desde el 2 de enero de 2012 hasta el 31 de enero de 2018, se obtuvieron de la estación meteorológica ubicada en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Austral de Chile (UACH) (Figura 2-1).

La batimetría del ERV se obtuvo a partir de cartas náuticas (SHOA (Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile), 2015). Esta información se combinó con un levantamiento topográfico digital de 2017 desde la ciudad de Valdivia hasta la desembocadura del ERV en Bahía Corral. Este eje tiene una longitud aproximada de 13,6 km, desde su cabecera en el puente Cruces hasta su desembocadura en Bahía Corral (Figura 2-1). Para el perfil longitudinal de salinidad, se ajustó un perfil lineal a los datos según Ec. 2-1:

$$S(x) = S_0 - 30,18 \cdot \frac{x}{L} \quad (\text{Ec. 2-1})$$

donde  $x$  es la coordenada longitudinal, su origen se considera la desembocadura del estuario,  $S_0$  es la salinidad en el lado mar y  $L$  es la longitud total del estuario. Los valores de salinidad se obtuvieron a partir de los perfiles proporcionados por Garcés-Vargas et al, (2013), en primavera (Sept 2000,  $S_0=26,75$  psu), verano (Ene 2001,  $S_0=32,34$  psu), otoño (Abr 2001,  $S_0=31,98$  psu), e invierno (Jun 2001,  $S_0=26,43$  psu).

#### 2.1.1.1 Régimen Mareal

Se realizó un análisis armónico para identificar los principales componentes de la marea (Pawlowicz et al., 2002) en el ERV. De las componentes astronómicas más relevantes, se consideran las 4 de mayor amplitud para calcular el coeficiente de Courtier  $A = (M_2+S_2)/(O_1+K_1)$  (Foreman, 1977). Estos componentes son los semidiurnos principales  $M_2$  y  $S_2$ , y los diurnos principales  $O_1$  y  $K_1$ , cuyas amplitudes correspondientes son 43,42 cm, 16,77 cm, 11,87 cm y 16,54 cm, respectivamente.

Se obtuvo un valor de  $A= 2,12$ , lo que indica que las mareas son mixtas, predominantemente semidiurnas en el ERV. Los rangos de marea en las mareas vivas y muertas son de aproximadamente 2 m y 0,2 m, respectivamente. Se trata, por tanto, de un estuario micromareal, lo que concuerda con el análisis presentado en Pino et al., (1994).

Los valores del prisma de marea obtenidos a partir de los datos del levantamiento topográfico cerca de la desembocadura del estuario en mareas vivas y muertas son  $P_{spring} = 2,7 \cdot 10^7 \text{ m}^3$  y  $P_{neap} = 2,7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ , respectivamente. Para obtener estos valores se han considerado amplitudes de marea viva y de marea muerta de 2 m y 0,2 m, respectivamente.

#### 2.1.1.2 Descarga del río

Los datos de descarga fluvial en la ERV se analizaron en términos de la función de densidad de probabilidad (pdf) y la función de densidad de probabilidad acumulada (FDP) de las series temporales de descarga (Figura 2-2). A partir de estas funciones, se seleccionaron los percentiles estándar 10<sup>o</sup>, 90<sup>o</sup> y 95<sup>o</sup> para establecer los rangos de descarga fluvial característicos.

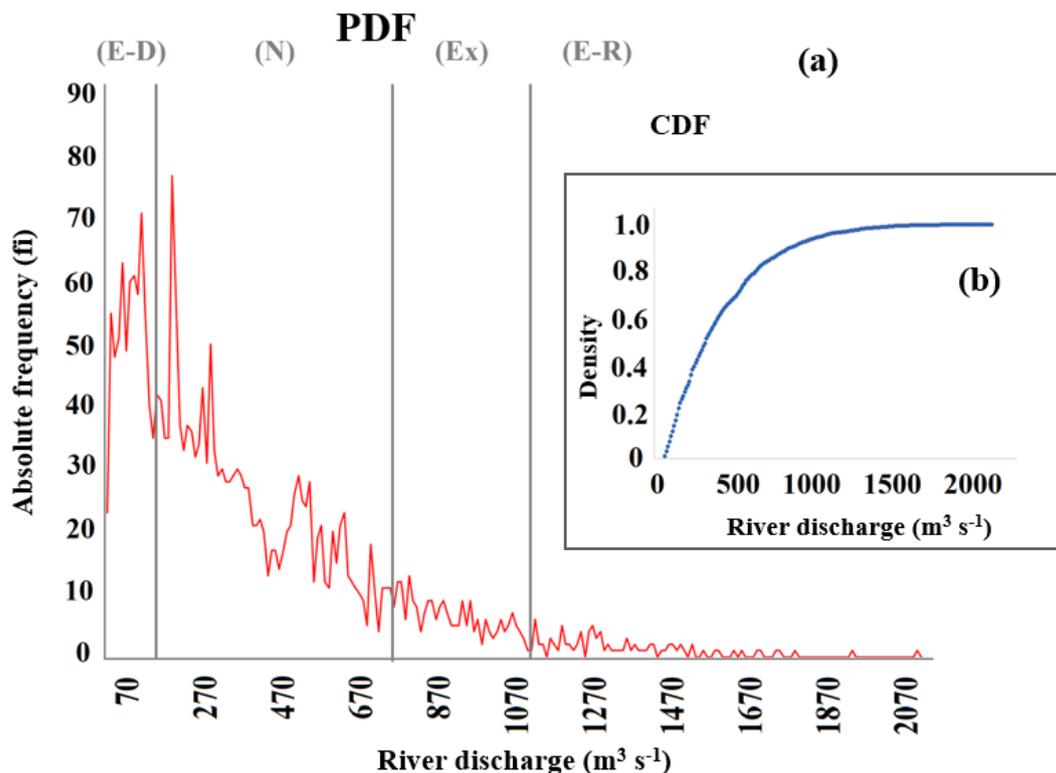
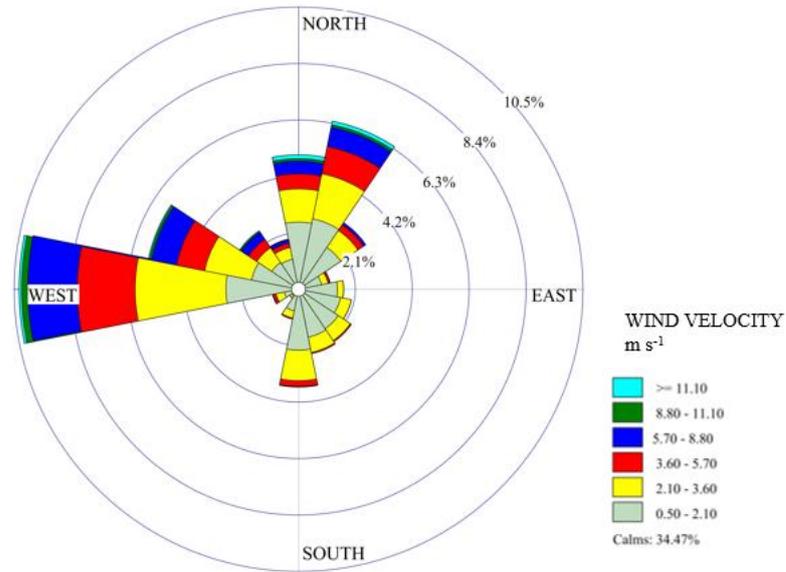


Figura 2-2 (a) Función de densidad de probabilidad, (b) Función de densidad de probabilidad acumulada para los datos de descarga del río ERV. Umbrales de los regímenes Exceptional Dry (E-D), Normal (N), Extreme (Ex) y Exceptional Rainy (E-R)

La mayoría de las descargas se sitúan en el percentil 90, con descargas de entre 123 y 887 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>. Por lo tanto, este intervalo se denomina régimen de descarga Normal (N) (Tabla 2-1). Para el intervalo del 95%, el valor máximo de descarga es de 1094 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>; éste se considera el régimen Extremo (Ex). Los caudales superiores a 1094 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> e inferiores a 123 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> se denominan régimen Excepcionalmente lluvioso (E-R) y Excepcionalmente seco (E-D), respectivamente (Tabla 2-1). Estos regímenes hidrológicos determinan en gran medida la estructura vertical de la columna de agua estuarina, además de la clasificación del estuario y la distribución de sus partículas en suspensión.

### 2.1.1.3 Viento

Otro mecanismo de forzamiento dominante en la circulación estuarina es el viento. Se realizó un análisis estadístico de magnitudes y direcciones, así como un análisis modal. Cabe señalar que, en el ERV, el viento contribuye menos a la mezcla que la marea; los efectos del viento se producen principalmente en la circulación submareal.



**Figura 2-3: Rosa de los vientos en la zona de estudio.**

La rosa de los vientos de la Figura 2-3 muestra que el viento predominante sobre la ERV es del Oeste, aproximadamente desde su desembocadura aguas arriba. La Tabla 2-1 muestra que esta dirección es predominante para todos los regímenes, un rasgo característico de la ERV. Las velocidades medias del viento en condiciones Normales fluctúan entre 0,5 y 3,6 m s<sup>-1</sup>, mientras que durante eventos excepcionales pueden superar los 10 m s<sup>-1</sup>.

**Tabla 2-1: Regímenes del ERV caracterizados por sus rangos típicos de marea, velocidades y direcciones del viento y descargas fluviales inferidas a partir de observaciones tomadas entre el 2 de enero de 2012 y el 31 de enero de 2018.**

Variables	Agent	Time Scale	Forcing	Conditions			
				Normal	Extreme	Exceptional Rainy	Exceptional Dry
Tidal range ( $T_R$ ) (m), Spring Tide	Tide	Semidiurnal	Astronomical	2 m	2 m	2 m	2 m
Tidal range ( $T_R$ ) (m), Neap Tide	Tide	Semidiurnal	Astronomical	0,2 m	0,2 m	0,2 m	0,2 m
Wind Velocity ( $m s^{-1}$ )	Wind	1-7 days	Meteorological	$0.5 < w < 3.5$	$3.5 < w < 8,8$	$8.8 < w$	$w < 0.5$
Wind direction ( $\theta$ )	Wind	1-7 days	Meteorological	W	W	W	W
River Discharge ( $m^3s^{-1}$ ) 1) Q	Discharge	1-7 days	Meteorological	$115 < Q < 765$	$765 < Q < 1090$	$1090 < Q$	$Q < 115$
Canter-Cremers Number ( $N_s - N_n$ )				0.5 - 5	1.4 - 14	2.1 - 21	0.2 - 2

\* $N_s$ : N spring, \*\* $N_n$ : N neap

## 2.2 Clasificación hidrodinámica del Estuario del Río Valdivia

El análisis de las series temporales de los principales forzamientos permite situar el ERV en el diagrama de circulación-estratificación de Geyer & MacCready, (2014), situando el estuario en un contexto más amplio. Para cada uno de los regímenes ERV (Tabla 3-1), se calcularon el número de Froude  $Fr_f$  y el parámetro de mezcla  $M$ . Esto proporciona una región de comportamiento para el estuario en el diagrama de circulación-estratificación. Estas condiciones o regímenes para la ERV definen el área sombreada azul indicada en la Figura 2-4, que muestra la variabilidad estimada de la ERV. Las líneas verticales rojas muestran el rango de mezcla de las mareas vivas a las muertas. El estuario se comporta típicamente como un estuario fuertemente estratificado durante las mareas muertas, mientras que durante las mareas vivas está parcialmente mezclado. El número de estuario  $N$  correspondiente puede calcularse para cada ciclo (Dyer, 1998), también conocido como número estuarino de Canter-Cremers. Los valores de  $N$  en los regímenes reflejan cada condición:  $N_{spring}$  y  $N_{neap}$  (fila inferior de la Tabla 2-1).

Las líneas azules horizontales de la Figura 2-4 identifican la ubicación de los distintos regímenes según su  $Fr_f$ . Estos son Lluvioso Excepcional (E-R), Extremo (Ex), Normal (N) y Seco Excepcional (E-D). Durante época estival, en condiciones Normal, Extrema y Excepcionalmente Seca, el ERV está fuertemente estratificado. Sin embargo, cuando el estuario se encuentra dentro del régimen Excepcionalmente Lluvioso, el patrón de circulación aparente es el de una cuña salina debido al aporte extra de flotabilidad inducido por la descarga de agua dulce. Por otro lado, el ERV cambia notablemente su patrón de circulación dependiendo del régimen en el que se evalúe el parámetro de mezcla de la marea viva. En primer lugar, en condiciones Normales y Extremas, el ERV se encuentra en un estado parcialmente mezclado. En segundo lugar, bajo condiciones Excepcionalmente Secas, el estuario varía entre parcialmente mezclado y, en menor medida, estratificación parcial inducida por la tensión.

Según estos resultados, aunque las analogías potenciales deben tratarse con precaución, el ERV podría mostrar patrones de circulación similares a los del río Hudson, el río James y la bahía de San Francisco (Figura 2-4). Esto podría proporcionar un punto de partida para comparar los estudios de distribución de partículas biológicas (Liu et al., 2018; Shen et al., 2019; Wang et al., 2019), así como el transporte de partículas y su influencia en los ecosistemas (Polanco et al., 2020; Ryan et al., 2019)

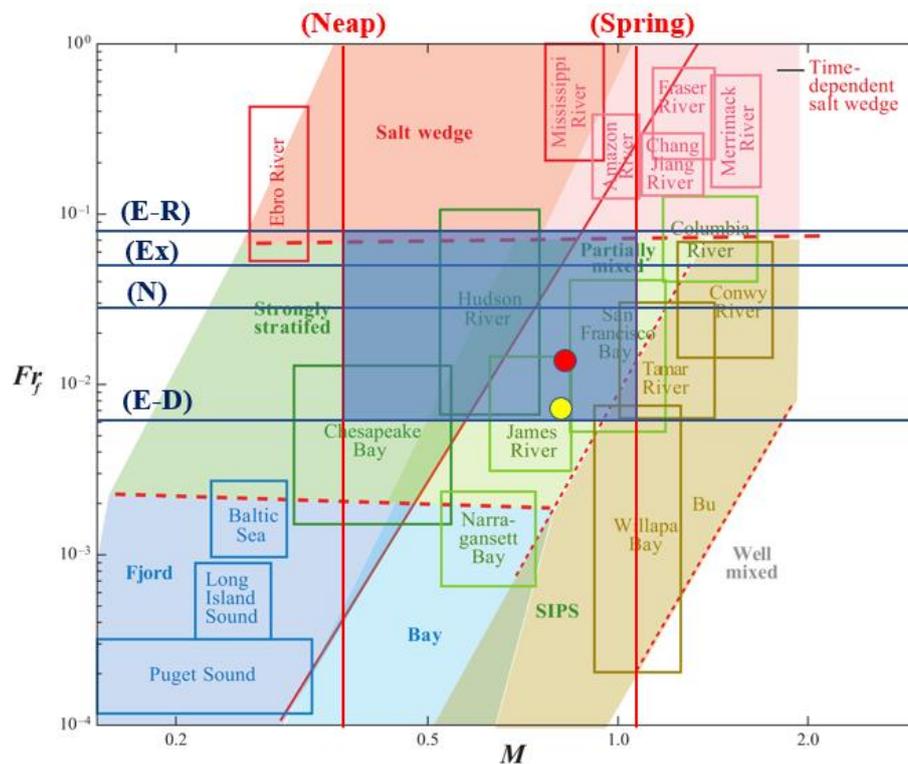


Figura 2-4: Diagrama de circulación-estratificación, adaptado de Geyer & MacCready (2014). El área en azul muestra la variabilidad estimada del ERV. Las líneas azules representan la ubicación de los regímenes según su  $Fr_f$ , y las líneas rojas muestran el parámetro de mezcla para las mareas vivas y muertas. Los círculos muestran las condiciones de la campaña realizada por Giesecke et al., (2017); en rojo están los datos de abril de 2014, y en amarillo los de enero de 2015.

Cabe señalar, que los sistemas hidrológico entorno a la ciudad de Valdivia comparten muchas similitudes con los demás ríos (Cruces, Pourulón, Cudico, Pichoy, Cayumapu, Calle Calle y Valdivia), estuarios y zonas húmedas que están entorno a la ciudad, por lo que se establece que los regímenes climáticos y de sus forzamientos ambientales son similares a los descritos por García-Ruiz et al., 2021. (Tabla 3-1) De acuerdo con la clasificación de Koeppen, la zona de estudio posee un clima lluvioso templado con influencia mediterránea, con un volumen importante de precipitaciones en invierno y ausencia de un periodo seco (CONAF, 1999).

### 2.3 Geomorfología

La cuenca del río Valdivia incluye al humedal del río Cruces, que según la clasificación de (Cowardin et al., 2005), reúne características propias de un estuarios interior, como cuerpo de agua en donde la desembocadura de un río se abre a un ecosistema marino, siendo posible encontrar una salinidad intermedia debido a la acción de las mareas (Dugan, 1992).

La geomorfología se caracteriza por zonas de vegetación en terrenos inundados y vegas no inundadas permanentemente. Además, el impacto del terremoto de 1960 en la ciudad de Valdivia, provocó el hundimiento de terrenos provocando inundaciones en zonas bajas volcánicas (CONAF, 1999). El tipo de suelo predominante es de origen volcánico, conocido en América Latina como “cancagua”, el cual se forman por la caída de material piroclástico fino, principalmente cenizas, endurecido posteriormente por cementación con carbonatos y sílice por procesos edáficos (Custode et al., 1992). Las muestras de sedimentos están constituidas principalmente por arenas con bajos porcentajes de gravas finas y muy finas, y una fracción de limos y arcillas de alrededor del 2% (DOP, 2017).

### 2.3.1 *Especies vegetales*

En el plan de manejo de la Reserva Nacional río Cruces es posible encontrar alrededor de 80 especies (CONAF, 1999). Siendo más representativas las correspondientes a la clase Magnoliopsida, con una distribución taxonómica como se describe en la Tabla 2-2.

Además, la especie *scirpus californicus* perteneciente a la clase mencionada anteriormente es una de las más abundante en los pantanos del río Cruces en conjunto con *egeria densa* y el *juncus procerus* (Ramírez et al., 1991). Esta especie vegetal posee tallos erguidos rígidos de un diámetro de 0,4-1 cm, con hojas basales reducidas a vainas, posee flores bisexuales, que forman extensos juncales permitiendo ayudar a la sedimentación al detener las aguas (Hurrell et al., 2006). Ver Figura 2-5.



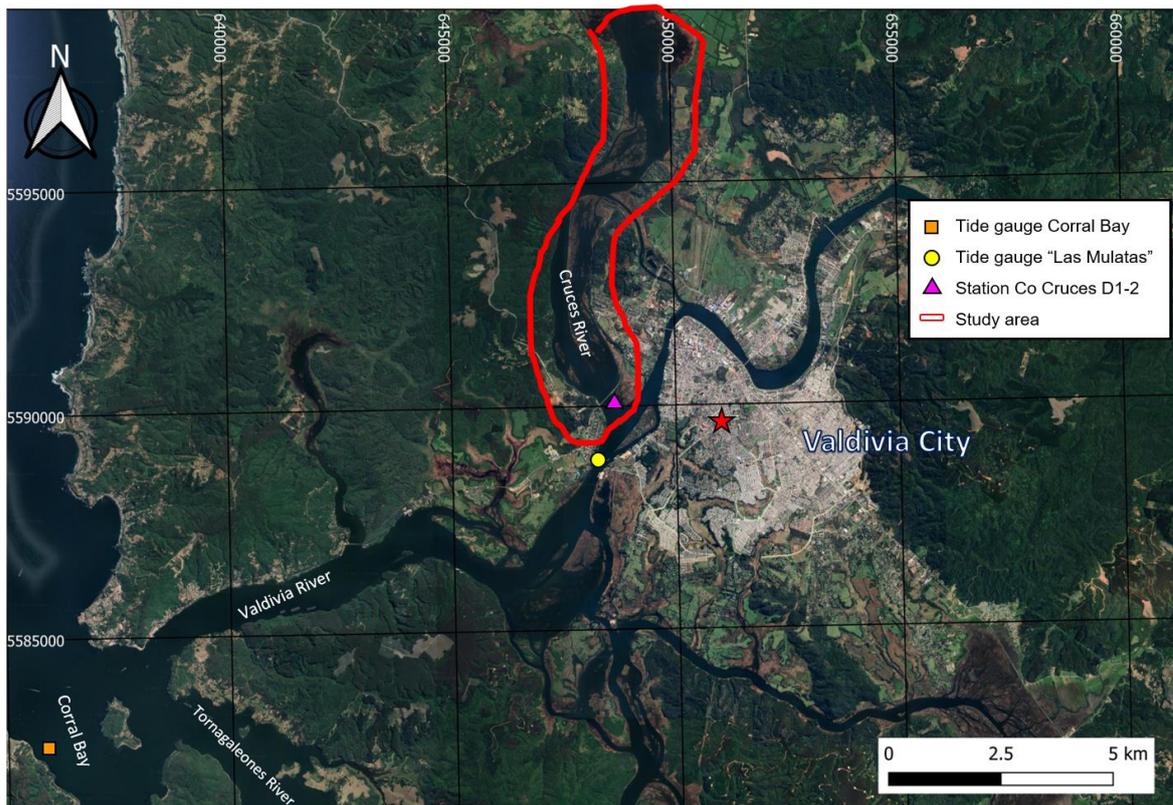
Figura 2-5: A. *Scirpus californicus*; B. *Egeria densa*; y C. *Juncus procerus*

**Tabla 2-2: Distribución taxonómica de la flora de la reserva** (Ramírez et al., 1991).

<b>Clase</b>	<b>Familia</b>	<b>Género</b>	<b>Especie</b>	<b>(%)</b>
Filocopsida	1	1	2	2,5
Magnoliopsida	27	43	49	61,25
Liliopsida	11	18	29	36,25
<b>Total</b>	<b>39</b>	<b>62</b>	<b>80</b>	<b>100</b>

### 2.3.2 Aporte de sedimentos

En cuanto a la concentración de sedimentos en el río Cruces, existe una gran importancia ecosistémica sobre la interacción de los sedimentos con las especies vegetales (Lopetegui et al., 2007) por lo que se han llevado a cabo una serie de estudios para determinar la concentración de los sedimentos y su relación con los macronutrientes en este cuerpo de agua (Lagos et al., 2008; Marin et al., 2014; Schaefer & Einax, 2010; Schwarz et al., 2012). Destacando el realizado por (Delgado et al., 2014), el cual corresponde a una revisión completa de la información científica disponible, donde se pueden establecer las concentraciones de sedimentos en diferentes zonas del río Cruce, gracias a las diferentes estaciones de muestreo instaladas entre los años 2004 y 2005. Para el caso de nuestra investigación, se utilizan los datos de la estación D1-2, ubicada en la intersección de los ríos Cruces y Calle, que dan lugar al río Valdivia. En ella se establece que el promedio de  $Co$ , es de  $10 \text{ mgL}^{-1}$ , con mínimas de  $2 \text{ mgL}^{-1}$  y máximas de  $13 \text{ mgL}^{-1}$  (Figura 2-6).



**Figura 2-6: Ubicación zona de estudio en río Cruces y estaciones de monitoreo, en sistema de coordenadas UTM-WGS84, Huso 18S. Se muestran las estaciones D1-2 de medición de Co y los mareógrafos de la bahía de Corral y Las Mulatas**

Por otro lado, la información obtenida del Informe de calidad de fondo, del estuario del río Valdivia (DOP, 2017), estableció que los sedimentos a lo largo del río, se componen principalmente de arena, con más del 93% del sedimento total. Dentro de la fracción de arena, se encontró que la arena gruesa (1-0,5 mm) era dominante en sus primeros kilómetros, mientras que la arena media (0,5-0,25 mm) era dominante al final del río. Esto separa el río en dos partes basadas en el rango textural de la fracción de arena, hubo una alternancia en la dominancia de arena gruesa y media, indicando una zona de transición entre las dos partes del río.

## 2.4 Características sismológicas

Esta zona de la costa chilena y sus estuarios se caracterizan por la típica actividad tectónica asociada a un margen convergente. Justo en el tiempo transcurrido desde la llegada de los conquistadores españoles (aproximadamente en 1500 d.C. (Lomnitz, 2004)) se han producido cuatro grandes terremotos, de los cuales destaca el que se produjo en 1960.

El terremoto, que alcanzó una magnitud de 9,5 en la escala de Richter, produjo un hundimiento tectónico de 2,5 m (Plafker & Savage, 1970; Barrientos et al., 1988) que provocó importantes cambios en la fisiografía y en las condiciones hidrográficas de los estuarios del sur de Chile. Por lo tanto, el Estuario del Río Valdivia puede ser clasificado desde el punto de vista fisiográfico como un estuario Tectónico (Fairbridge, 1980) o un estuario Primario Estructural (Perillo et al., 1999) .

A lo largo de Chile, la actividad sísmica está regida por la interacción y subducción entre la placa de Nazca y la Sudamericana, donde la primera se está instalada bajo la segunda (Kendrick et al., 2003), generando eventos sísmicos denominados interplaca e intraplaca. En la región de los Ríos, además se incluyen terremotos de tipo cortical, debido a las fallas superficiales ubicadas en Liquiñe-Ofqui (Astroza et al., 2002).

Debido a la peligrosidad que generan los terremotos a los centros urbanos, en Chile se han desarrollado una serie de estudios que buscan evaluar el riesgo sísmico, donde el primer trabajo de estas características corresponde al de Greve (Greve, 1949), estableciendo los coeficientes de seguridad a la respuesta sísmica de infraestructura en distintos lugares de Chile, luego Lomnitz (1969), establece el primer mapa de riesgo sísmico de Chile, utilizando cálculos probabilísticos (Poisson) para terremotos de un magnitud mayor a 7,5 Mw. Posteriormente se han desarrollado una serie de trabajos en diferentes lugares de Chile, para lograr una mayor aproximación de los riesgos sísmicos destacando (Barrientos 1980; Martin 1990; Alvarez et al. 2002; Leyton, Ruiz, and Sepulveda 2010). Por lo tanto, el Estuario del Río Valdivia puede ser clasificado desde el punto de vista fisiográfico como un estuario Tectónico (Fairbridge, 1980) o un estuario Primario Estructural (Perillo et al., 1999).

Por otro lado en el caso particular de la ciudad de Valdivia, junto con los estudios de riesgos de peligrosidad sísmica, se han llevado a cabo trabajos de microzonificación sísmica, debido a la compleja composición geológica de los suelos que componen la ciudad, según lo descrito por Alvarado, Valdebenito, and Burgos (2019): “Desde el punto de vista de la conformación geológica y geomorfológica, la ciudad de Valdivia se divide en dos zonas diferenciadas. En el sector este se desarrolla ampliamente una terraza continua, compacta y elevada a niveles entre 9 y 15 metros, subdividida superficialmente por estratos de arena cementada conocida localmente como cancagua. Por otra parte, el sector oeste posee una distribución espacial de los suelos más compleja, constituida por mesetas elevadas de cancagua rodeadas por depresiones del terreno de formas irregulares y de fondo relativamente plano”. En este trabajo, se realiza una evaluación de 45 zonas del área urbana de la ciudad (Figura 2-

7), con la utilización de equipos de micro vibración (sismógrafos triaxiales), los que arrojaron perfiles de velocidad ( $V_s$ ) para distintas profundidades, lo que permitió conformar un mapa de características geotectónicas y respuesta sísmica para toda la zona urbana de Valdivia, donde se aprecia las características de los distintos tipos de suelos de la ciudad y su aptitud para la construcción (Figura 3-6), los cuales van desde “muy buena” (rocas estables, sin peligro de remociones en masa), hasta “muy mala” (Zona de humedales y vegas con un alto peligro de desprendimientos en masa).

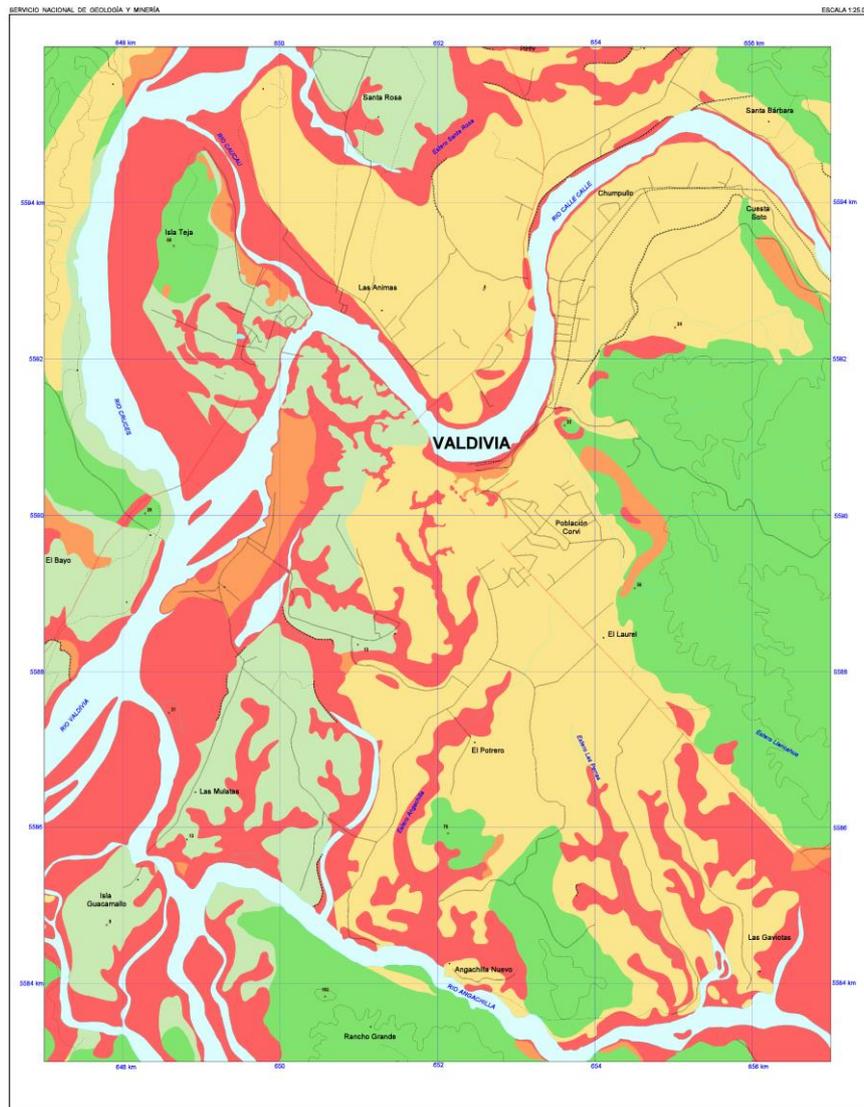


Figura 2-7: Mapa de características geotectónicas de Valdivia. (Alvarado et al., 2019)

En este capítulo se examina la circulación y distribución de sedimentos en el estuario del río Valdivia bajo diferentes condiciones ambientales, utilizando un enfoque combinado observacional y de modelación en el estuario del río Valdivia. Se clasificaron las condiciones ambientales en Normal, Extremo, Excepcionalmente Lluvioso y Seco, las cuales están influenciadas por la geometría del estuario, el flujo de agua dulce y la producción de turbulencia en la columna de agua. La geomorfología del estuario se caracteriza por zonas de vegetación en terrenos inundados y vegas no inundadas permanentemente, con suelo de origen volcánico conocido como "cancagua". Los sedimentos del río Valdivia están compuestos mayoritariamente por arena, alternando entre arena gruesa y media. El terremoto de 1960 causó un hundimiento tectónico que provocó cambios significativos en la fisiografía y condiciones hidrográficas de los estuarios del sur de Chile. El Estuario del Río Valdivia se puede clasificar como un estuario Tectónico o Primario Estructural, desde el punto de vista fisiográfico. Además, de presentar los trabajos de microzonificación sísmica en la ciudad de Valdivia debido a la complejidad geológica de sus suelos.

## **Capítulo 3. Evolución del interés científico por el uso y la gestión del suelo en las ciudades costeras: centrado en humedales**

El desarrollo urbano es una actividad típica de nuestras sociedades, que adquiere relevancia cuando se vincula a zonas cercanas a la costa, ya que cerca del 40% de la población mundial se sitúa en el litoral. Debido a la actual crisis climática y a la subida del nivel medio del mar, las zonas costeras bajas se han vuelto más vulnerables. Estas zonas y su desarrollo urbano deben estar basados en políticas, estrategias y planes de adaptación. Este capítulo evalúa la evolución de las contribuciones científicas en la gestión del uso del suelo en los sistemas costeros a través de la cartografía científica. Aquí se aplicará el software SciMAT para analizar la evolución del concepto de "gestión del uso del suelo en ciudades costeras" a través de una revisión de registros bibliográficos y un análisis bibliométrico de 2.510 trabajos seleccionados de la base de datos Web of Science en un periodo comprendido entre 1987 y 2020. Los resultados muestran una correlación directa entre los problemas del cambio climático, la subida del nivel del mar y cómo esto afecta a la planificación urbana de las ciudades en términos de vulnerabilidad al riesgo de inundaciones costeras. Las investigaciones en curso destacan la necesidad de explorar modelos de adaptación activa a la nueva realidad climática, ya que son más eficaces para reducir la aparición de inundaciones a largo plazo.

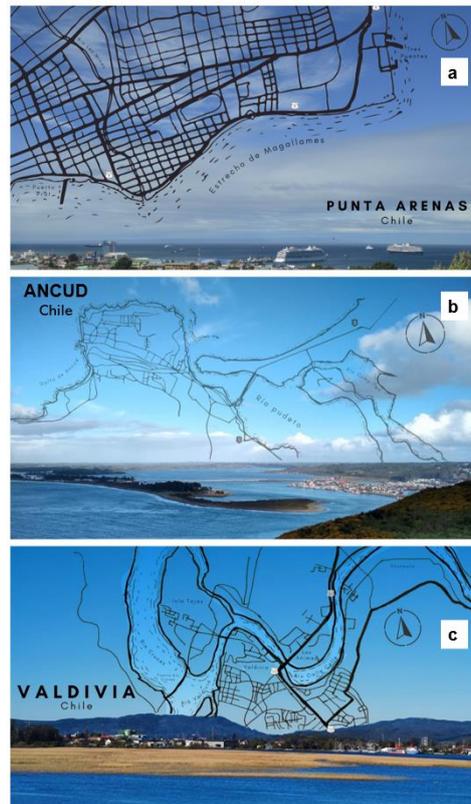
### **3.1 El desarrollo urbano en zonas costeras**

La urbanización es un proceso comunitario que favorece el desarrollo socioeconómico, pero también genera conflictos medioambientales. El crecimiento urbano de las ciudades ha sido la actividad humana más importante en el desarrollo de cambios ambientales y ecosistémicos irreversibles a escala global en las últimas décadas (Thornes, 2002). Esto ha influido en la interacción social y ecológica de nuestras sociedades con el medio ambiente (Grimm et al., 2008; Seto et al., 2010). En los últimos años, la literatura ha explorado las motivaciones y los mecanismos de la urbanización, como los estudios relacionados con la ocupación urbana en las regiones costeras son de gran interés, ya que cerca del 40% de la población mundial vive en zonas costeras (Golberg, 1994; ONU, 2017) y ciertas investigaciones que han determinado que el desarrollo urbano está claramente influido por las condiciones medioambientales, geofísicas, institucionales y socioeconómicas en todo el mundo (G.

Li et al., 2018). Además, los centros urbanos se convierten en focos de expansión de las comunidades vecinas, que ocupan un territorio más extenso. Esto es especialmente importante en las zonas costeras, que tienen un área de influencia tanto terrestre como intermareal y marina. (De Andres & Barragán, 2016), donde se espera un aumento de la población del 20% en las próximas tres décadas. En el caso de las zonas de influencia costera (Figura 3-1) (por ejemplo, costas descubierta al mar, estuarios y humedales), históricamente han sido habitadas por los seres humanos, debido a la accesibilidad a diversos elementos que han proporcionado necesidades básicas a las comunidades humanas (De Andres & Barragán, 2016; Golberg, 1994). En la actualidad, las zonas de influencia costera favorecen el desarrollo industrial, pesquero y turístico (Barragán & de Andrés, 2015; Elsharouny, 2016; Lai et al., 2015). El desarrollo de las comunidades humanas ha ido modificando las costas de múltiples formas. Muchos de estos cambios son permanentes y surgen como resultado de las numerosas actividades que tienen lugar en la zona costera y que son llevadas a cabo por gestores e ingenieros costeros.

El proceso de adaptación al cambio climático, y en particular a la subida del nivel del mar, requiere una planificación y previsión estratégicas y adaptativas del desarrollo urbano costero. (Abadie et al., 2020; Lorie et al., 2020). Por ello, resulta crítico conocer los patrones de evolución científica asociados a la gestión del uso del suelo en ciudades costeras (LUM-CC por sus siglas en inglés) (Figura 3-1), que sirvan de guía para futuros estudios en el diseño de políticas públicas y estrategias de adaptación.

En respuesta a esta necesidad, el objetivo principal de este capítulo es analizar el desarrollo global de la investigación en esta área de conocimiento, identificando tendencias y conceptos clave, para contribuir a la orientación de futuras investigaciones en este campo e identificar temas de creciente interés.



**Figura 3-1: Ejemplos de ciudades costeras vinculadas a diferentes ambientes: (a) descubierta al mar; (b) Estuario; y (c) Humedal.**

### **3.2 Metodología para el análisis bibliográfico**

Como se muestra en la Figura 3-2, la metodología de este capítulo considera dos macro grupos de análisis asociados a las ciudades costeras: "Plan de ordenación" y "Usos del suelo". Con los cuales se han desarrollado los criterios temáticos de búsqueda, según:

- (i) Recoger artículos científicos de las bases de datos WoS en conocimiento entre 1987 y 2020 asociados a LUM-CC.
- (ii) Realizar una revisión cuantitativa mediante análisis bibliométrico y cartografía científica para encontrar tendencias.
- (iii) Analizar los resultados obtenidos del análisis bibliométrico para identificar temas de interés creciente.

La cartografía científica muestra los componentes estructurales y dinámicos del trabajo científico mediante mapas gráficos. Estos gráficos representan en un determinado

campo del conocimiento a los documentos de la especialidad y/o autores individuales y cómo se relacionan entre sí.

Para el desarrollo de la cartografía científica se utilizará un software de código abierto, SciMAT (Science Mapping Analysis Software Tool) que agrega procedimientos, algoritmos y mediciones para evaluar cada paso del flujo de trabajo general de la cartografía científica (M. Cobo et al., 2011). SciMAT aplica medidas bibliométricas, como el índice h (Alonso et al., 2009), índice g (Egghe, 2006), índice hg (Cabrerizo et al., 2010), que describen el nivel productivo del desarrollo del investigador e informan sobre el número de artículos de un cluster. SciMAT se ha aplicado con éxito en muchos ámbitos, como la gestión (Lv et al., 2021; Santana & Cobo, 2020), urbanismo (Carpio et al., 2020; Sharifi, 2021), construcción (Díaz-López et al., 2019; Nalbandian et al., 2021),26] and salud (Casado-Aranda et al., 2021; Salazar-Concha et al., 2021), entre otros.

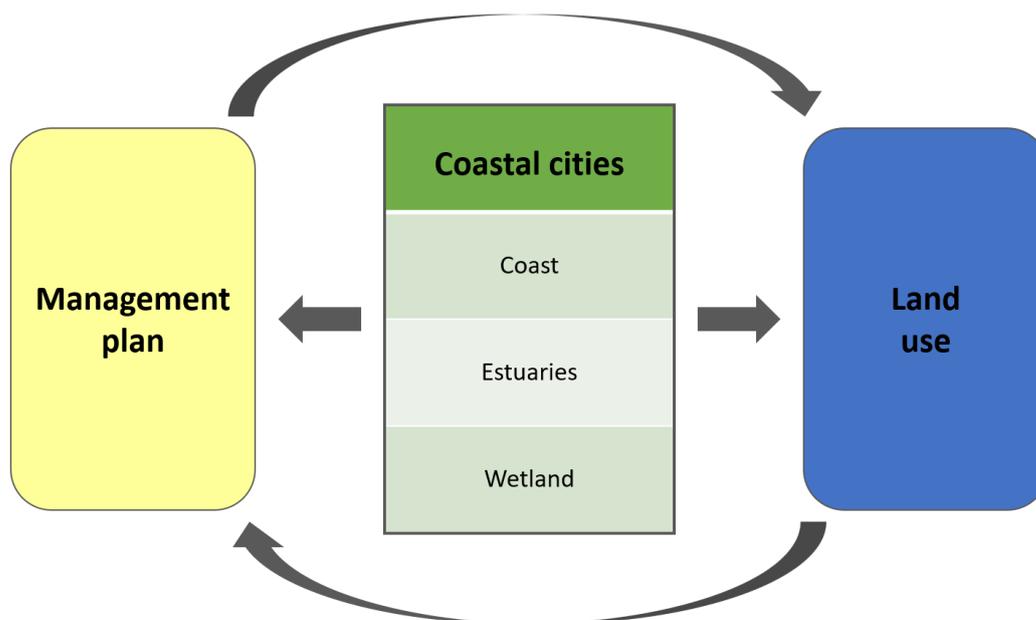


Figura 3-2: Relación entre los dos macrogrupos de búsqueda y los tipos de costa.

### 3.2.1 Análisis bibliométrico

El análisis bibliométrico se dividió en dos partes, un análisis bibliométrico de rendimiento y un análisis de cartografía científica. El análisis bibliométrico de rendimiento corresponde a una revisión estadística de indicadores bibliométricos, como el número de citas y sus artículos publicados (índice h), la distribución geográfica de los artículos y autores más citados (M. J. Cobo et al., 2015).

La búsqueda bibliográfica se realizó identificando la literatura relevante asociada al concepto matriz LUM-CC (Figura 3-3), utilizando criterios específicos, que evitan cualquier posibilidad de sesgo, indicados por Thomé et al. (Thomé et al., 2016) y actualizados por Díaz-López et al. (Díaz-López et al., 2019):

1.- Search planning : “Land-use management in coastal cities” (LUM-CC)

2.- Database selection: Web of Science (WOS)

3.- Keyword selection: (TS = (“estuar\* management plan\*” or “coastal\* management plan\*” or “shoreline\* management plan\*” or “coastal land use\*” or “estuar\* land use\*” or “wetland\* land use\*” or “coastal cit\*” or “coastal town\*”)) This formula as a result, found a total of 2,510 items

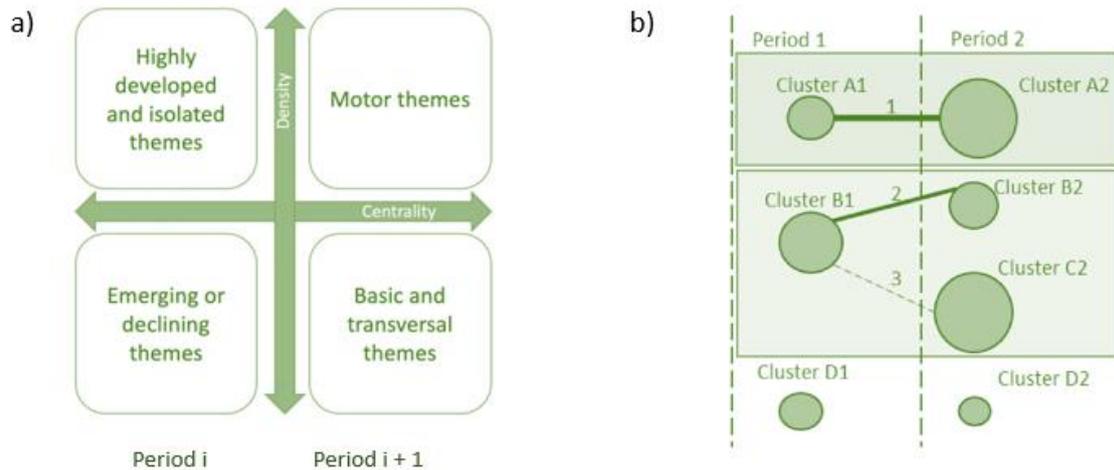
4.- Final selection of literature: WoS Categories: Geosciences, Multidisciplinary; Engineering Environmental Studies; Water Resources; Geography, Physical; Oceanography; Environmental; Green & Sustainable Science & Technology; Geography; Urban Studies; Multidisciplinary Sciences; Engineering, Civil; Imaging Science & Photographic Technology; Regional & Urban Planning; Construction & Building Technology; Engineering, Ocean; Area Studies; Development Studies; Engineering, Multidisciplinary; Engineering, Marine; Transportation; Architecture; and Transportation Science & Technology. Number of articles to be studied is 1,386.

5.- Determination of time period of analysis: the years proposed by WoS, between 1987 and 2021, were considered, but it has been decided to limit the range to 2020 in order to comply with full years. Four periods were then defined. These were distributed in order to ensure that no period exceeded 450 or was less than 300 documents, as follows (1987-2013) (419), (2014-2017) (340), (2018-2019) (312) and finally a period corresponding to the year 2020 (315).

**Figura 3-3: Diagrama de selección de trabajos de investigación.**

### 3.2.2 Mapeo científico

El análisis de los mapas científicos corresponde a una representación gráfica de la evolución temporal de un determinado campo del saber y de sus autores (Nalbandian et al., 2021), que en este caso se desarrolló utilizando el programa SciMAT. Este programa realiza un análisis bibliométrico del contenido de los artículos basado en la cartografía científica utilizando la metodología de Cobo et al., (2012, 2011), este software es una herramienta de cartografía científica gratuita y de código abierto, estas características permiten a cualquier usuario analizar la evolución conceptual, intelectual y social de un campo científico, así como definir la importancia de los trabajos en el contexto de diferentes periodos de tiempo y el vínculo entre palabras clave. Tras el análisis bibliométrico, SciMAT genera organigramas (Díaz-López et al., 2019) (Figura 3-4).



**Figura 3-4: Diagrama de flujo de PRISMA: (a) diagrama estratégico; (b) mapa de evolución. Basado en (M. Cobo et al., 2012).**

Los diagramas estratégicos (Figura 3-4a.), corresponden a una representación bidimensional de los resultados, donde los temas se dividen en cuatro categorías, analizando su densidad y centralidad. La densidad establece la fuerza de los vínculos internos dentro de un grupo temático y se utiliza como nivel de desarrollo del tema, mientras que la centralidad mide el grado de fuerza de los vínculos externos de los temas con otros, lo que nos ayuda a interpretar la relevancia de un tema en el contexto global de un campo de investigación. (M. Cobo et al., 2011).

El mapa de evolución temática (Figura 3-4b) muestra el desarrollo de los temas y la relación entre ellos de un periodo a otro (de  $i$  a  $i+1$ ). Los círculos representan los distintos grupos, cuyo tamaño es directamente proporcional al número de publicaciones. Las líneas continuas indican que los temas relacionados comparten una palabra clave, la línea de puntos muestra que los temas comparten palabras que no son el nombre del tema. Por último, el tamaño de la línea está relacionado con la tasa de inclusión (M. Cobo et al., 2011).

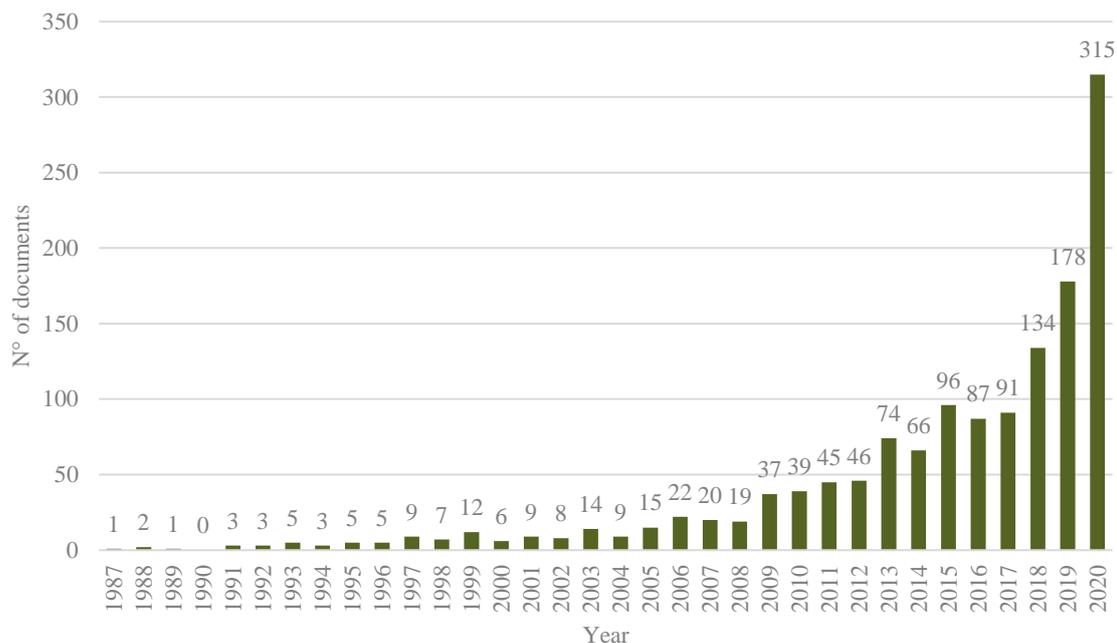
### 3.3 Resultados y discusión

#### 3.3.1 Revisión del análisis bibliométrico por unidad de rendimiento

##### 3.3.1.1 Distribución de los trabajos por año de publicación

La Figura 3-5 muestra la distribución anual de las 1.386 publicaciones sobre el tema de estudio entre 1987 y 2008. Cabe destacar que desde 2015, cuando se firmó el

acuerdo 2030 - Agenda para el Desarrollo Sostenible. (Nations, 2015), se ha producido un aumento sustancial de la producción científica (100). Entre 2019 y 2020, los dos últimos años de este análisis temporal, la producción científica ha sido la más alta con más del 35% de los artículos analizados, consolidándose la temática LUM-CC debido al interés por el cambio climático, la subida del nivel del mar y el aumento del número de personas que viven en ciudades costeras (Abadie et al., 2020; De Andres & Barragán, 2016; Golberg, 1994; Lorie et al., 2020).



**Figura 3-5: Distribución temporal de los estudios publicados por año.**

### 3.3.1.2 Distribución geográfica de los documentos

Se consideró el país de afiliación informado por los autores principales (primer autor del estudio) y, para identificar el origen geográfico de los documentos, se seleccionaron los 25 países con mayor número de publicaciones de los 93 en total (Tabla 3-1). Además, en esta misma tabla, se realiza una comparación entre la producción científica y el número de habitantes por país, así como los kilómetros de costa, con el fin de ofrecer una perspectiva diferente sobre la distribución geográfica del estudio y los principales países productores.

**Tabla 3-1: Número de documentos por países y proporción de documentos por población y por km de costa.**

País	N° of documentos	Ranking – N° of doc.	Doc. por millón de habitantes	Ranking – Doc. por millón de habitantes	Doc. por km de línea de costa · 10 <sup>-4</sup>	Ranking – Doc. por km de línea de costa
<b>PRC</b>	469	1	0.32	18	317.93	3
<b>USA</b>	271	2	0.81	11	135.01	7
<b>Australia</b>	92	3	1.71	1	35.71	18
<b>UK</b>	84	4	3.55	6	94.13	10
<b>Brazil</b>	54	5	0.04	22	58.74	13
<b>India</b>	52	6	0.92	25	80.00	11
<b>Spain</b>	49	7	1.00	7	94.68	9
<b>Italy</b>	47	8	0.21	12	57.89	14
<b>South Korea</b>	47	9	0.73	9	194.78	4
<b>Japan</b>	41	10	2.39	19	13.44	23
<b>Netherlands</b>	40	11	0.32	4	909.09	1
<b>Germany</b>	35	12	0.97	16	146.50	6
<b>Canada</b>	34	13	0.42	8	1.83	25
<b>France</b>	31	14	3.35	15	57.70	15
<b>Iran</b>	30	15	0.34	17	118.85	8
<b>Portugal</b>	30	16	0.43	2	189.63	5
<b>Indonesia</b>	25	17	0.09	24	4.39	24
<b>Mexico</b>	25	18	0.17	23	23.58	21
<b>Greece</b>	21	19	2.03	5	15.36	22
<b>Turkey</b>	20	20	0.53	21	25.00	19
<b>Saudi Arabia</b>	19	21	0.55	14	71.97	12
<b>Singapore</b>	18	22	0.21	3	880.83	2
<b>Chile</b>	17	23	2.88	10	24.86	20
<b>Malaysia</b>	16	24	0.83	13	38.50	17
<b>South Africa</b>	14	25	0.23	20	50.04	16

Los resultados que figuran en la Tabla 2-1 se deben principalmente al volumen de desarrollo y de inversión en investigación de cada país. En la mayoría de los casos, parece existir una relación entre la inversión realizada en investigación (UNESCO, 2020) y los kilómetros de costa.

Se puede observar cómo cambia la posición de la producción científica de los países si se expresa en términos absolutos, y/o si se aplica el análisis por millón de habitantes Australia, Portugal, y por kilómetros de costa: Países Bajos y Singapur por delante de RPC y EEUU que tiene el mayor número absoluto de documentos.

### 3.3.1.3 Documentos con mayor número de citas

Del total de 1.386 documentos evaluados, la Tabla 3-2 presenta los 10 trabajos más citados por orden decreciente. Cabe destacar que el artículo más citado (933) supera ampliamente a los demás documentos con casi 400 citas sobre el siguiente (545). Se observa que cuatro de los diez artículos más citados se desarrollaron durante 2012, mientras que el trabajo de investigación más antiguo se desarrolló en 1989, logrando 421 citas y situándose en tercer lugar. En términos generales, la mayoría de estos trabajos relacionan el cambio climático con la subida del nivel del mar y sus posibles consecuencias para las ciudades.

**Tabla 3-2: Diez documentos más citados sobre el tema de estudio, presentados en orden decreciente (30/08/2021).**

N°	Title	Authors	Journal – Quartile*	Year	Citations
1	Future flood losses in major coastal cities	Hallegatte, S Green, C Nicholls, RJ Corfee-Morlot, J	NATURE CLIMATE CHANGE (Q1)	2013	933
2	Coastal eutrophication as a driver of salt marsh loss	Deegan, LA Johnson, DS Warren, RS Peterson, BJ Fleeger, JW Fagherazzi, S Wollheim, WM	NATURE (Q1)	2012	545
3	Satellite-derived urban heat islands from 3 coastal cities and the utilization of such data in urban climatology	Roth, M Oke, TR Emery, WJ	INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING (Q2)	1989	438
4	Hotspot of accelerated sea-level rise on the Atlantic coast of North America	Sallenger, AH Doran, KS Howd, PA	NATURE CLIMATE CHANGE (Q1)	2012	424
5	A flood vulnerability index for coastal cities and its use in assessing climate change impacts	Balica, SF Wright, NG van der Meulen, F	NATURAL HAZARDS (Q2)	2012	299
6	The vulnerability of global cities to climate hazards	de Sherbinin, A Schiller, A Pulsipher, A	ENVIRONMENT AND URBANIZATION (Q2)	2007	225

\*de acuerdo con Journal Citation Report

**Tabla 3-2. Diez documentos más citados sobre el tema de estudio, presentados en orden decreciente (30/08/2021). (continuación)**

7	Increasing risk of compound flooding from storm surge and rainfall for major US cities	Wahl, T; Jain, S; Bender, J; Meyers, SD; Luther, ME	NATURE CLIMATE CHANGE (Q1)	2015	224
8	Doubling of coastal flooding frequency within decades due to sea-level rise	Vitousek, S Barnard, PL Fletcher, CH Frazer, N Erikson, L Storlazzi, CD	SCIENTIFIC REPORTS (Q1)	2017	221
9	China's urban expansion from 1990 to 2010 determined with satellite remote sensing	Wang, L; Li, CC; Ying, Q; Cheng, X; Wang, XY; Li, XY; Hu, LY; Liang, L; Yu, L; Huang, HB; Gong, P	CHINESE SCIENCE BULLETIN (Q2)	2012	202
10	Modeling spatial variations of urban growth patterns in Chinese cities: The case of Nanjing	Luo, J; Wei, YHD	LANDSCAPE AND URBAN PLANNING (Q1)	2009	200

\*de acuerdo con Journal Citation Report

### 3.3.2 Análisis del mapeo científico

#### 3.3.2.1 Gráfico de superposición y mapa de evolución temática para LUM-CC

Para el mapa de evolución temática, las palabras clave son diferentes en número y lexicografía en cada uno de los subperíodos: P1:1987-2013, P2:2014-2017, P3:2018-2019 y P4:2020 (Figura 3-6). Se puede observar cómo los clústeres asociados a LUM-CC han evolucionado utilizando diferentes palabras clave para explicar la temática de las obras en cada periodo. Por ejemplo, en P1 se encuentra el cluster "land-use" (usos del suelo), que se mantiene sin cambios en el segundo y tercer periodo (línea continua), e incluso incorpora la temática del cluster "wetlands" (humedales) en P2 mostrando su relación intrínseca con las temáticas de usos del suelo, para finalmente

evolucionar al cluster "flood" (inundaciones) en P4, que a su vez ha incorporado la temática del cluster " sea-level-rise" (subida del nivel del mar), generando una relación de las temáticas matrices en este periodo.

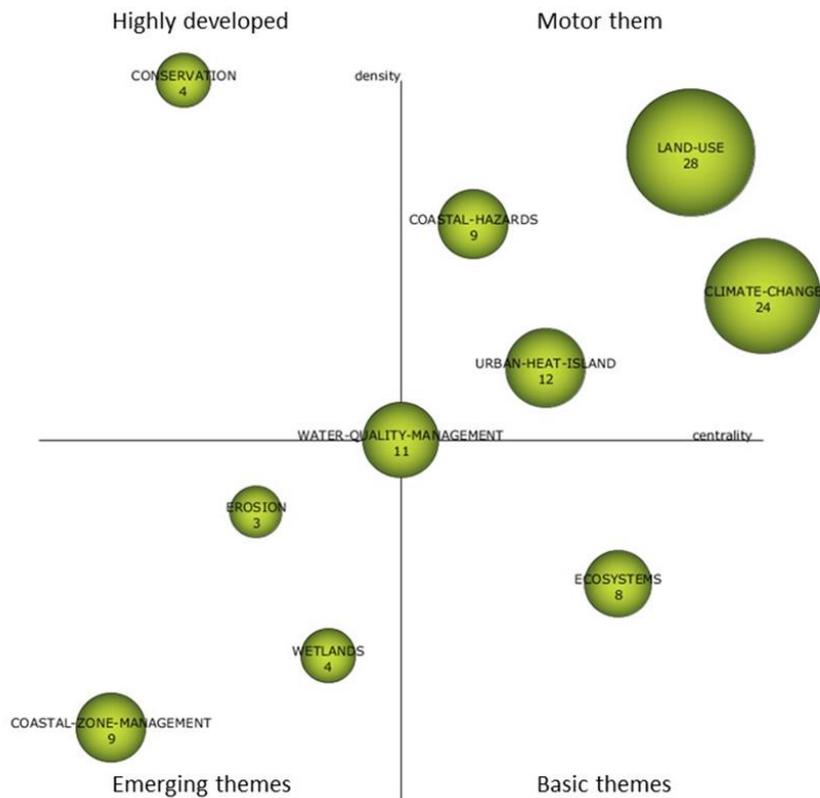
Considerando el cluster " climate-change" (cambio climático), éste evoluciona a " sea-level-rise" (subida del nivel del mar), tema que se mantiene para los periodos dos y tres, hasta unirse al cluster "tides" (mareas), que a su vez es una derivación de "temporal variations" (variaciones temporales). Por otro lado, la evolución del primer periodo del cluster "coastal-zone-management" (gestión de zonas costeras) se dirige hacia la palabra clave "framework" (marco de trabajo), tema que comparte un vínculo conceptual con "climate-change" (cambio climático) y que evoluciona hacia "water quality management" (gestión de la calidad del agua), este último cluster no evoluciona directamente con los otros, sino que transfiere algunos temas hacia el cluster "coastal-hazards" (peligros costeros) en P4.



centra en estos diagramas de estrategia y en los indicadores de resultados que se ven arriba en (Figura 3:7-10), para cada periodo. Además, se analizan los principales resultados de los trabajos con mayor número de citas.

### 3.3.2.3 Primer periodo (1987-2013)

Si analizamos el diagrama de la Figura 3-7, de las 419 publicaciones analizadas en este periodo, se observan cuatro temas conductores, “land-use”; “climate-change”; “coastal-hazards”; y “urban-heat-island”, que son temas bien desarrollados y se reflejan en los trabajos más citados de este periodo, donde el tema del “land-use” está relacionado con los “coastal-hazards” a los que nos enfrentamos como consecuencia del “climate-change”, p. ej., el artículo más citado cuantifica las pérdidas actuales y futuras por inundaciones debidas al “climate-change” y “sea-level-rise”, evaluando la vulnerabilidad de las principales ciudades costeras del mundo e indicando la necesidad de mejorar las protecciones costeras actuales, ya que la magnitud de las pérdidas cuando se producen inundaciones aumentaría, a menudo en más de un 50%, por lo que es esencial prepararse también para catástrofes mayores en el futuro (Hallegatte et al., 2013).



Cluster 1	Num. of documents	Num. of cites (30/08/21)	h-index	Centrality	Density
Coastal-hazards	9	138	6	10.53	7.87
Land-use	28	1,106	14	18.00	9.74
Urban-heat-island	12	522	9	12.49	7.56
Climate-change	24	1061	14	23.37	7.81
Ecosystems	8	783	8	17.88	5.70
Water-quality-management	11	236	7	6.67	6.48
Coastal-zone-management	9	232	6	2.79	2.52
Conservation	4	203	4	3.10	12.33
Erosion	3	129	3	3.14	5.71
Wetlands	4	111	4	4.41	3.61

Figura 3-7: Diagramas estratégicos y cluster correspondientes al P1 1987 - 2013.

Por otro lado, encontramos un tema básico y transversal (los ecosistemas), que es el eje esencial de muchos estudios de la época. (e.g. (Deegan et al., 2012; Wardekker et al., 2010)) pero no es el protagonista de los temas de estudio.

Además, el tema desarrollado de la "conservation" no tiene mayor relevancia en el desarrollo del campo de conocimiento LUM-CC, que, aunque se aborda en algunos de los trabajos (Deegan et al., 2012), pierde relevancia en los temas conductores del periodo. Por último, observamos tres temas emergentes o en declive (coastal-zone-management, erosion and wetland), con baja densidad y centralidad. El primero es el que tiene mayor presencia en los trabajos más citados del periodo (Luo & Wei, 2009; L. Wang et al., 2012).

Por otro lado, si observamos los resultados para cada cluster temático (Figura 2:7-10), se aprecia que "land-use" y "climate-change" son los clusters más relevantes, ambos con el mayor número de documentos, índice h, y "climate-change" tiene el mayor número de citas (1061) de todos los documentos analizados.

Cabe destacar que, durante este periodo, se publicaron ocho de los diez artículos más citados (Tabla 2-2), incluido el primero "Future flood losses in major coastal cities" de (Hallegatte et al., 2013), con 933 citas.

#### 3.3.2.4 Segundo periodo (2014-2017)

En este periodo, los trabajos se han centrado claramente en el estudio de los efectos de la subida del nivel del mar sobre los riesgos de inundación en las ciudades costeras. Según el diagrama presentado en la Figura 3-8, de las 340 publicaciones analizadas, se identificaron cuatro temas impulsores ("sea-level-rise", "land-use", "framework" and "simulation") En general, estos temas muestran que los fenómenos climatológicos, como las olas extremas y las mareas de tempestad, generan un mayor riesgo de inundaciones en las zonas costeras bajas que cualquiera de ellos por separado. En Estados Unidos, por ejemplo, el aumento a largo plazo del nivel del mar se ha identificado como el principal impulsor de la aceleración de las inundaciones a lo largo de la costa. (Wahl et al., 2015). Otros autores han evaluado cómo la subida del nivel del mar aumenta la frecuencia de los fenómenos de inundación sobre las zonas costeras, y cómo los periodos de frecuencia se acortarán en las próximas décadas, y estos efectos combinados con las inundaciones fluviales pueden ser desastrosos para las ciudades costeras (Bilskie et al., 2014; Horton et al., 2014; Moftakhari Rostamkhani et al., 2017; Vitousek et al., 2017), lo que exige una zonificación del riesgo de inundación en las zonas pobladas cercanas a la costa (Rahmati et al., 2015).

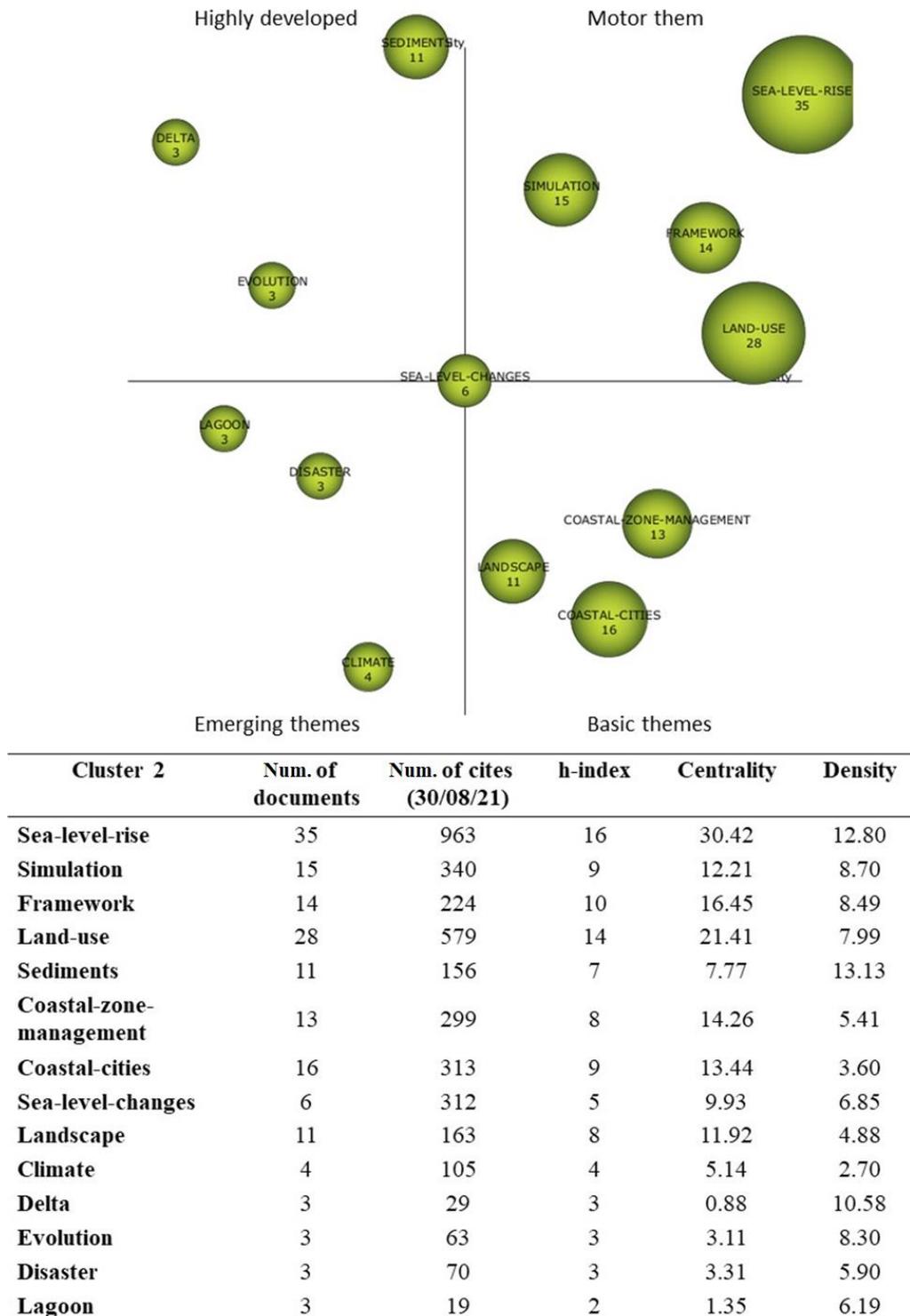


Figura 3-8: Diagramas estratégicos y cluster correspondientes al P2 2014 - 2017.

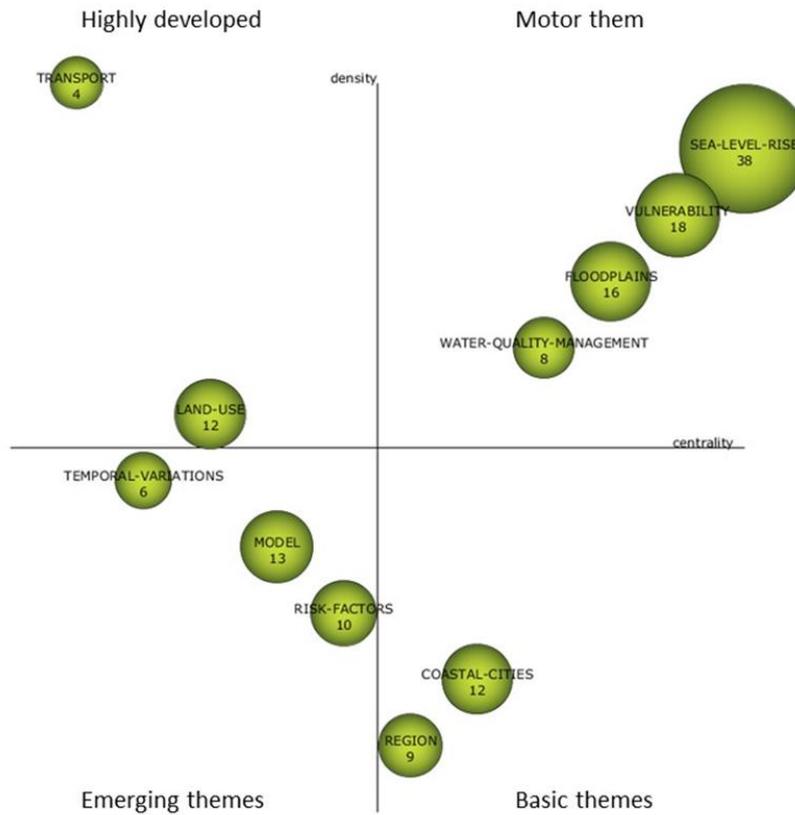
A continuación, se observan tres temas básicos y transversales (“coastal-zone-management”, “coastal-cities” and “landscape”) cada vez más desarrollados respecto al periodo anterior, que establecen la importancia de la gestión y planificación de las zonas costeras en el futuro (Lai et al., 2015). También se encontraron dos temas

aislados (“delta” and “evolution”) ya que están algo alejados del ámbito de LUM-CC y no están presentes en los trabajos más citados del periodo. Por otro lado, tres temas emergentes o en declive (“climate”, “lagoon” and “disaster”), este último muy presente en las investigaciones del periodo (por ejemplo, (Horton et al., 2014; Vitousek et al., 2017)).

En cuanto a las medidas de rendimiento, destaca el cluster "sea-level-rise" con el mayor número de documentos dentro del periodo (35), el mayor número de citas (963) y el mayor índice h (16) de todos los periodos analizados, mientras que el segundo cluster "land-use" cuyos documentos son (28) y 579 citas.

#### 3.3.2.5 Tercer período (2018-2019)

Según el esquema presentado en la Figura 3-9, de los 312 documentos analizados, cuatro temas se consideran conductores (“sea-level-rise”, “vulnerability”, “floodplains” and “water-quality-management”), lo que indica una tendencia similar a la del periodo anterior, vinculando los “flood-risks” a “sea-level-rise”, desde el punto de vista de la vulnerabilidad de las ciudades costeras a estos fenómenos, evaluando si la adaptación de estas zonas ha sido deficiente o satisfactoria, en relación con los fenómenos hidrológicos que se han producido históricamente, que se han visto acelerados por el cambio climático y el desarrollo urbano incontrolado (Chan et al., 2018; Torabi et al., 2018).



Cluster 3	Num. of documents	Num. of cites (30/08/21)	h-index	Centrality	Density
Sea-level-rise	38	366	11	30.53	15.94
Vulnerability	18	152	8	26.83	10.62
Floodplains	16	105	6	25.11	7.75
Water-quality-management	8	38	2	17.99	5.94
Land-use	12	80	6	7.10	5.88
Model	13	117	6	10.91	3.86
Region	9	46	4	11.48	2.06
Risk-factors	10	61	5	11.07	3.35
Coastal-cities	12	55	5	14.16	2.89
Temporal-variations	6	53	4	5.81	4.94
Transport	4	69	3	3.10	16.67

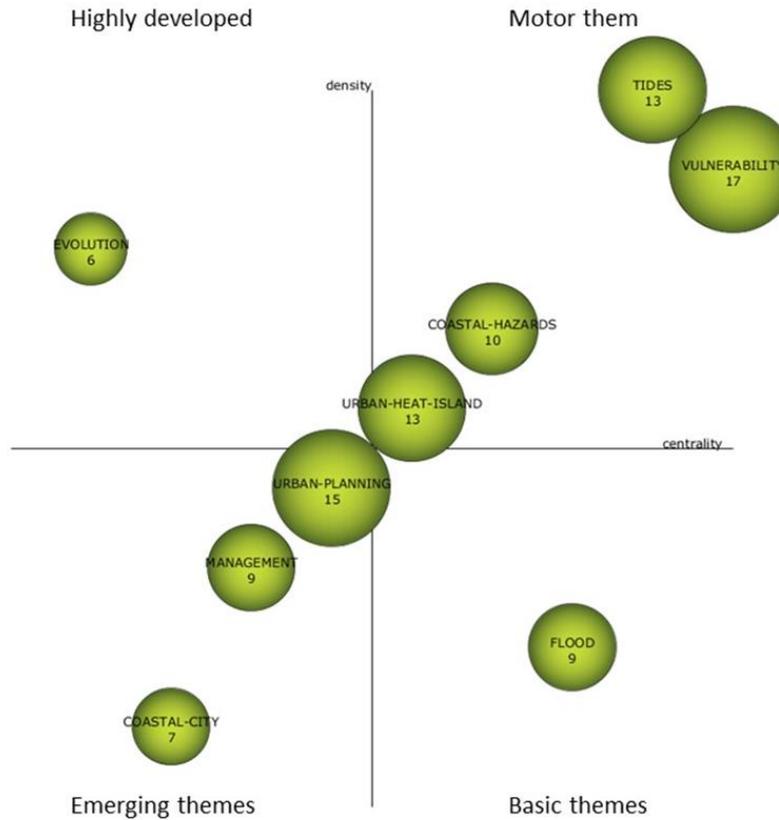
Figura 3-9: Diagramas estratégicos y cluster correspondientes al P3 2018 - 2019.

Además, dos temas básicos y transversales (“coastal-cities” and “region”) están presentes en la mayoría de los estudios más citados del periodo. Los temas muy desarrollados y/o aislados (“land-use” and “transport”) se refieren a la identificación del “land-use” y “land cover”, ya que estos patrones pueden ser importantes para que los

responsables de la toma de decisiones y los gestores de recursos integren los análisis en las prácticas de gestión del uso del suelo costero descritas en Abdullah et al., 2019, y la planificación del transporte urbano, que requiere soluciones técnicas inteligentes y respetuosas con el medio ambiente para ser sostenible (Ghorbanzadeh et al., 2019). A continuación, se observaron tres temas en declive o emergentes (“model”, “risk-factor” and “temporal-variations”). El objetivo es aportar una contribución con la modelización numérica, que permita una transferencia de conocimientos para desarrollar programas de gobernanza de las inundaciones (Sadler et al., 2018).

#### 3.3.2.6 Cuarto periodo (2020)

Por otra parte, si observamos el diagrama de la Figura 3-10, de los 315 trabajos analizados, se identificaron cuatro temas conductores (“vulnerability”, “tides”, “urban-heat-island” y “coastal-hazard”) marcando claramente la preocupación del estado de vulnerabilidad de las ciudades costeras ante los riesgos de inundaciones y su necesidad de pautas de adaptación a esta nueva realidad climática (Du et al., 2020; Nazarnia et al., 2020), or otro lado, la cuestión de las islas de calor urbanas y las interacciones con el clima costero también está emergiendo claramente como un tema conductor (He et al., 2020; X. Zhou et al., 2020), quí los investigadores proponen un estudio para mitigar este problema, a través de un diseño razonable, sensible al viento marino, que puede ser un enfoque factible para esta mitigación, específicamente la relacionada con la brisa marina, que puede ser una buena fuente de refrigeración, por lo que estas variables deben tenerse en cuenta para la planificación y el diseño urbano (He et al., 2020).



Cluster 4	Num. of documents	Num. of cites (30/08/21)	h-index	Centrality	Density
<b>Vulnerability</b>	17	21	3	23.74	13.86
<b>Urban-heat-island</b>	13	35	3	10.05	9.48
<b>Coastal-hazards</b>	10	50	4	11.59	9.89
<b>Tides</b>	13	30	3	23.64	15.52
<b>Urban-planning</b>	15	29	4	9.73	4.79
<b>Management</b>	9	5	1	8.49	4.36
<b>Evolution</b>	6	8	2	2.96	10.46
<b>Flood</b>	9	8	2	16.67	3.92
<b>Coastal-city</b>	7	31	2	3.87	1.96

Figura 3-10: Diagramas estratégicos y cluster correspondientes al P4 2020.

En cuanto a los temas básicos y transversales, encontramos "flood", que corresponde a un tema importante dentro de los estudios descritos en el párrafo anterior, luego, sólo hay un tema establecido y aislado (evolution), muy trabajado internamente, pero aislado de los demás temas. Por último, observamos tres temas emergentes o en

declive (“urban-planning”, “management” and “coastal-city”) donde los estudios en esta área consideran el urbanismo desde el punto de vista de la contaminación y el desarrollo económico, lo que se refleja en las investigaciones deof (Su et al., 2019) y (Khan & Hasan, 2020) respectivamente.

Analizando el comportamiento de este último cluster temático, se observa que "tides", "urban-heat-island" y "coastal-hazards" son los clusters más relevantes, destacando este último concepto por encima de los demás, al tener un mayor índice h y número de citas que los demás. Esto indica que el estado de los conocimientos está evolucionando a la hora de determinar cómo el cambio del nivel del mar supone un peligro costero importante para los centros urbanos ante futuras inundaciones. Esto se vincula con “tides”, desde una perspectiva en que recientes investigaciones (Baranes et al., 2020; Haigh et al., 2020), han mostrado como estos cambios afectan a las mareas y sus amplitudes, afectando a las zonas costeras.

Como ya se ha señalado, inicialmente, los estudios discutían la importancia de la planificación urbana para afrontar los retos que el cambio climático plantearía en el futuro, generando peligros y amenazas para el urbanismo costero. Las predicciones se están cumpliendo cada vez más en los últimos tiempos: las catástrofes naturales que afectan a las ciudades costeras son cada vez más recurrentes, debido a los efectos de la subida del nivel del mar y al riesgo de inundaciones. La investigación actual no se centra en soluciones para mitigar estos efectos del cambio climático, sino que aborda más bien el estado de vulnerabilidad de las infraestructuras costeras. Se hace hincapié en el valor de las estrategias de reorganización de los usos actuales del suelo y de una futura planificación urbana responsable, destacando la necesidad de estudiar pautas de adaptación a esta nueva realidad climática.

### 3.3.3 *Trabajos de investigación y red temática según el tipo de costa*

Este apartado está dedicado a analizar los estudios según los tipos de litoral a los que se refieren, representados en la Figura 3-1: (a) océano y mar; (b) estuarios; y (c) humedales. Se presentarán los principales estudios de cada sección y los clusters más representativos proporcionados por SciMat para estas palabras clave.

Centrándonos en el análisis de clusters de "sea and ocean" cluster analysis, podemos observar que existe una relación directa entre ambas palabras clave, que a su vez

están relacionadas con el tema de "prediction", lo que va en consonancia con lo establecido en el apartado anterior, presentando la importancia de la previsión de futuros eventos climáticos costeros, como la subida del nivel del mar, y los riesgos de inundaciones en las ciudades costeras (Hallegatte et al., 2013; Sallenger et al., 2012; Vitousek et al., 2017; Wahl et al., 2015). SciMat SciMat presenta la relación entre el mar y el uso del suelo, que se refleja en cómo el cambio del nivel del mar hace necesario predecir los efectos que tendrá en la planificación del uso del suelo en las ciudades costeras (R. Nicholls, 2011).

La relación entre el tema conductor y los conceptos de "sediment" y "water", que a su vez están interrelacionados, es relevante para dar cuenta de la relación entre el transporte y la acumulación de sedimentos (tanto naturales como artificiales) como aguas costeras (Su et al., 2019).

En cuanto al medio estuarino, SciMat muestra una relación intrínseca con los humedales, lo cual es de esperar debido a las relaciones ecosistémicas que existen entre ellos (Valle-Levinson, 2011). Se observó una conexión con "management" y "water" en cuanto al impacto que puede tener la planificación urbanística colindante con estuarios en la calidad del agua (Ruiz-Luna & Berlanga-Robles, 2003). También está relacionada con la palabra clave "impact", que apunta al entorno urbano y a cómo provoca cambios en las redes tróficas de los estuarios (Deegan et al., 2012).

Los estudios de investigación sobre los humedales en SciMat indican que la pérdida de estos ecosistemas es un problema cada vez más grave debido a la práctica de la "land reclamation", lo que destaca la necesidad de mejorar la gestión ("management") del uso del suelo a nivel global (Bilskie et al., 2014). Luego la relación de los humedales con el cambio climático, coincide en gran medida con los trabajos comentados anteriormente en el apartado 3.2.2 (Deegan et al., 2012; Glasby & Connell, 1999; Ruiz-Luna & Berlanga-Robles, 2003), además, cabe destacar el trabajo descrito en (R. J. Nicholls & Hoozemans, 1996), que muestra los efectos del cambio climático y el estado de vulnerabilidad de estos hábitats ante las intervenciones humanas.

Para comprender mejor la evolución temporal de los trabajos, su alcance y aplicación en cada tipo de zona costera descrita en este apartado, se presenta la Tabla 3-3, en la que se identifican los conocimientos explorados por los investigadores, los métodos de investigación existentes y los debates científicos que han mantenido.

**Tabla 3-3: Resumen de los principales estudios por periodos y zona costera**

<b>Zona costera</b>	<b>Periodo</b>	<b>Estudios principales</b>	<b>Herramientas de análisis</b>	<b>Conclusiones principales</b>
<b>Abierto al mar</b>	P1	Preocupación por las consecuencias económicas, medioambientales y sociales del cambio climático. (Balica et al., 2012; Hallegatte et al., 2013; Schiller et al., 2007).	- Análisis de series temporales - Base de datos urbanos locales	Uso de Índices de vulnerabilidad frente al peligro costero.
	P2 y P3	Se observa que los efectos del cambio climático empiezan a hacerse latentes a través de la subida del nivel del mar, (Lorie et al., 2020; Vitousek et al., 2017; Wahl et al., 2015), y como peligro de inundaciones en las ciudades costeras.	- Análisis de datos - Proyecciones del nuevo escenario climático - Modelos numéricos	Necesidad de aunar esfuerzos científicos y técnicos, pero sobre todo gubernamentales, para evaluar el desarrollo costero (Torabi et al., 2018). Integración de la ingeniería ecológica y social.
	P4	Existe principalmente la idea de la necesidad de adaptación, indicando que debemos asumir nuestra nueva realidad climática (Du et al., 2020).	-Análisis de los efectos del forzamiento climático en las ciudades costeras. - Cartografía por satélite	Ofrecer nuevas herramientas de protección, no sólo barreras y/o muros de contención, sino códigos de construcción actualizados y medidas basadas en la naturaleza que serán más eficaces para reducir las inundaciones a una escala temporal más larga.
<b>Estuarios</b>	P1	Acciones humanas que afectan al medio ambiente estuarino, materiales de construcción y desarrollo urbano	-Visualización por satélite. - Análisis de los datos registrado.	Desarrollar estrategias de planificación de la gestión de los estuarios para integrar el desarrollo urbano mediante la gestión integral de las zonas costeras.

		(Farrapeira et al., 2007; Ruiz-Luna & Berlanga-Robles, 2003; Yang & Liu, 2005).		
	P2	Centrarse en el seguimiento tanto de la expansión urbana (Pourebrahim et al., 2014) como de los riesgos de inundación debidos a la subida del nivel del mar. (Dyckman et al., 2014; G. Wang et al., 2014).	-Visualización por satélite. - Análisis multicriterio. - Modelos hidrodinámicos	Aplicar técnicas de evaluación multifactorial para la integración de los criterios sociales, económicos y ambientales que rigen la ordenación del territorio.
	P3 y P4	Estudios que evalúan actualmente el riesgo de inundación de las ciudades situadas en ríos próximos al mar (Cheng et al., 2018; Dykstra & Dzwonkowski, 2020) y el uso de herramientas eficaces para proteger las ciudades de los riesgos de inundación (Hall et al., 2019). Además de viviendas resilientes (Nekooie et al., 2017).	-Análisis de los datos registrados. - Análisis SIG. - Mediciones batimétricas costeras	Mejora de la integración de parámetros de campo para obtener simulaciones más realistas. Generar propuestas de mitigación y adaptación activas, como el uso de barreras móviles y equipos mecánicos de bombeo que, combinados y situados más cerca del mar, mejoren la eficacia o considerar la construcción viviendas anfibas o sobre pilotes.
<b>Humedales</b>	P1	La influencia del cambio climático en la subida del nivel medio del mar afectará a la erosión costera, la salinización de las aguas y el deterioro de los humedales. (R. Nicholls, 2011; Sallenger et al., 2012)	- Análisis de series temporales - Base de datos urbanos locales	Necesidad de planes de adaptación proactivos, que evalúen: (1) proteger, (2) acomodar o (3) eliminar infraestructuras. (R. J. Nicholls & Hoozemans, 1996)

P2 y P3	Preocupación sobre la expansión urbana de las ciudades reduce la superficie de los humedales (Duan et al., 2016b; Y. Li et al., 2014)	- Análisis SIG. - Modelos numéricos.	Implementar estrategias de gestión inteligente para ayudar a resolver el problema de la erosión costera, considerando un análisis de decisión multicriterio para identificar los regímenes de gestión más deseables (X. Li et al., 2018)
P4	Se reabre la preocupación por el riesgo de inundación de humedales debido a la subida del nivel medio del mar (Du et al., 2020). Además de los efectos de la contaminación derivada de las actividades humanas sobre estos hábitats (Balogun et al., 2020)	-Evaluar las imágenes de satélite.	Incluir medidas de adaptación de las infraestructuras costeras, evaluando factores económicos y sociales, considerando estrategias blandas

### 3.3.4 Evolución de los estudios sobre humedales

Al evaluar la clasificación de los artículos de investigación publicados por tipo de costa, se observó que la planificación urbana en zonas costeras estuarinas y de humedales representa el 11,9% y el 8,9% de todos los artículos, respectivamente, mientras que la investigación en zonas costeras marinas y oceánicas representa el 79,2%. Esto nos da una idea de que la investigación sobre los efectos y las condiciones futuras de las zonas costeras húmedas aún no está consolidada y evoluciona con el tiempo. Además, se eligió este tipo de litoral (humedales) porque estos ambientes suelen ser indicadores tempranos del cambio de los ecosistemas, ya que son muy sensibles a las variaciones del nivel medio del mar y a las alteraciones que esto puede provocar en sus procesos biogeoquímicos e hidrodinámicos, ya que representan puntos calientes de biodiversidad, al sustentar la presencia de múltiples nichos de hábitat y, por tanto, de especies de gran interés ambiental (Fastelli et al., 2018).

Por lo tanto, los humedales costeros urbanos (wetland coastal urban WCU) se han incluido como una subsección del CZM. Del total de artículos analizados en este estudio, 67 relacionados con los humedales se muestran en la Figura 3-11.

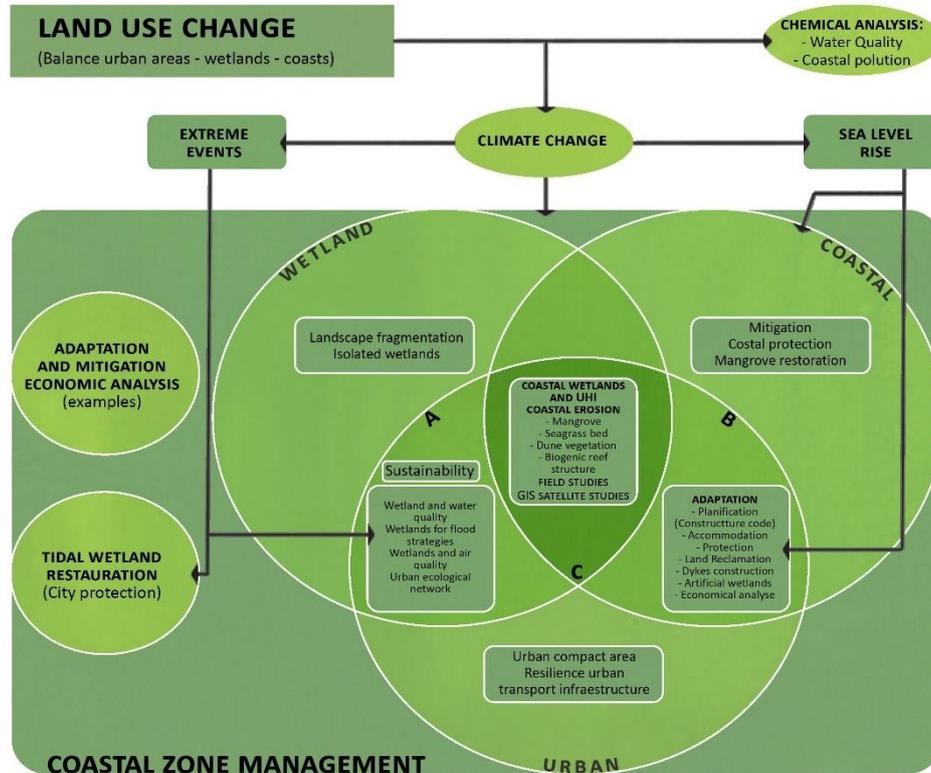


Figura 3-11: Resumen de las tendencias de la investigación en toda la serie cronológica de trabajos sobre el uso y la gestión del suelo en ciudades costeras, centrándose en las zonas húmedas. A: Interacción humedal-ciudad; B: Interacción ciudad-costa y C: Interacción humedal-costa-ciudad.

La Figura 3-11. muestra la conexión entre el uso del suelo, el desarrollo de los humedales urbanos y su relación con la zona ribereña, todo ello dentro del CZM. La figura muestra cómo los trabajos han centrado su análisis principalmente en el cambio climático y las distintas dimensiones temporales de sus efectos y su impacto en la zona ribereña. Por un lado están los eventos extremos (cada vez más frecuentes en el planeta), el aumento sostenido del nivel medio del mar, sus implicaciones y problemas para la CZM, el primero de los cuales requiere una mayor protección urbana y los problemas económicos generados por una inadecuada preparación ante eventos extremos (R. J. Nicholls & Hoozemans, 1996), y los impactos sobre la sostenibilidad (urbano-humedal), en aspectos como la calidad del agua y del aire (Gracia et al., 2018; Zhu & Zeng, 2018). Por otro lado, el aumento del nivel medio del mar, al ser una condición sistemática del planeta, provoca la necesidad de adaptación en las ciudades costeras (urbano-costero), como cambios en los códigos y normativas de construcción,

creación de zonas de protección, humedales artificiales, etc (Du et al., 2020; Y. Zhang et al., 2020).

Analizando el problema de encontrar un equilibrio entre estos tres aspectos, los estudios realizados en todos los periodos de tiempo han demostrado una pérdida constante de superficie de humedales debido al desarrollo urbano. Ya en la década de 1980 se demostró que el asentamiento humano en los humedales del sur de Florida alteró las fuentes de CH<sub>4</sub>, lo que provocó una pérdida de superficie de aproximadamente el 33,6% entre 1900 y 1973 (Harriss et al., 1988). O utilizando metodología SIG para estimar áreas urbanas en Mazatlán, México (Ruiz-Luna & Berlanga-Robles, 2003), se encontró un aumento de las áreas urbanas entre 1973 y 1997 (25,1 km<sup>2</sup> a 54,5 km<sup>2</sup> +117,3%) y una disminución de los manglares (9,11 km<sup>2</sup> a 7,71 km<sup>2</sup> -15,5%). Estos no fueron los únicos trabajos que mostraron esta tendencia, otros trabajos como (Ellis et al., 2011; Enaruvbe & Ige-Olumide, 2015; Fastelli et al., 2018; Halls & Magolan, 2019; Xie et al., 2011), ponen de manifiesto este problema a nivel mundial. Por otro lado, los humedales con influencia costera suman a las amenazas antropogénicas de pérdida de superficie, el efecto del cambio climático responsable de la SLR. Los primeros trabajos en este campo advertían de que la subida del nivel del mar podría reducir 2.800 km<sup>2</sup> de humedales, lo que supondría un coste de protección de 43.600 millones de dólares (1990) (R. J. Nicholls & Hoozemans, 1996). Por ello, en las últimas décadas se han realizado trabajos que muestran numerosas alternativas para proteger los humedales y las infraestructuras costeras (Cheng et al., 2018; Du et al., 2020; Kim, 2020b; Lv et al., 2021; Y. Zhang et al., 2020), como se muestra en la Figura 3-12:

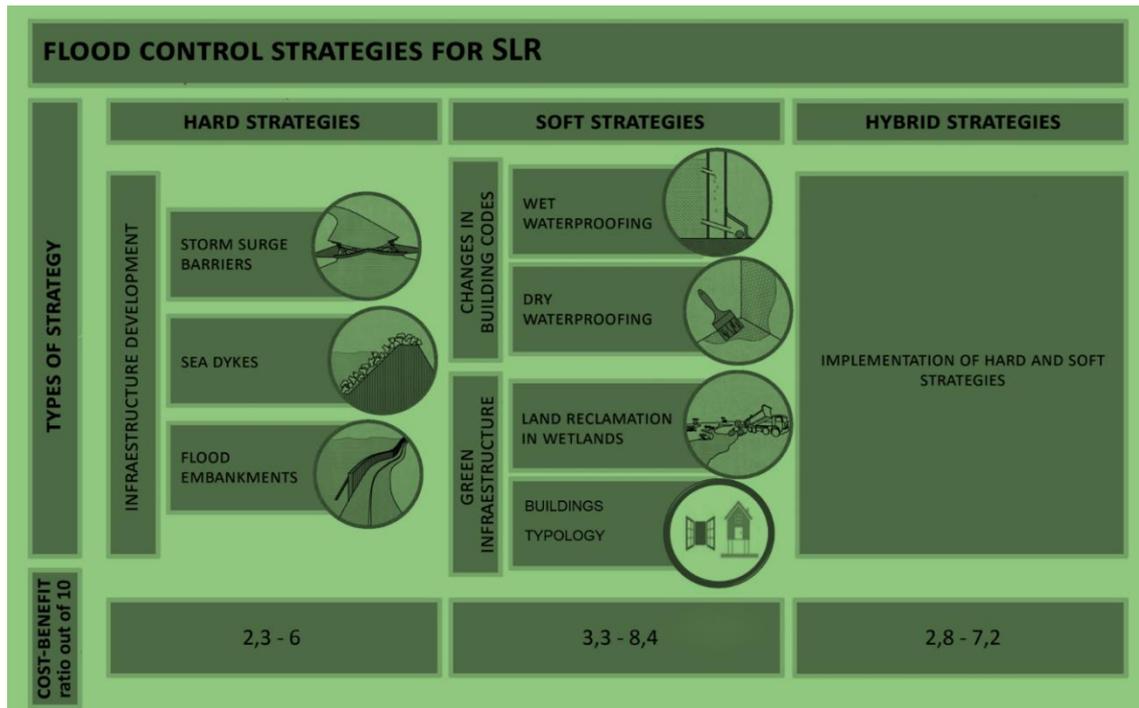


Figura 3-12: Estrategias de control de inundaciones por SLR en humedales y su relación coste-beneficio de 10.

En cuanto a las estrategias estrictas, corresponden principalmente a barreras contra mareas de tempestad, diques marinos y muros de contención. El objetivo principal de estos elementos es evitar que la zona en cuestión se inunde durante una tormenta o marea alta. En el caso de una barrera contra mareas de tempestad, suele tratarse de una estructura móvil que normalmente se cierra antes de una tormenta y luego se vuelve a abrir para facilitar el transporte de mercancías y embarcaciones, mientras que los diques marítimos y los muros de contención de inundaciones son estructuras rígidas que se utilizan para proteger comunidades costeras, ensenadas de marea, ríos y estuarios de fenómenos meteorológicos extremos (Degrieck et al., 2006). Estas soluciones se han utilizado en proyectos como la laguna de Venecia, el puerto de Rotterdam, Shanghái y la ciudad de Nueva York, entre otros (Cheng et al., 2018; Degrieck et al., 2006; Pirazzoli, 1991; Rosenzweig et al., 2011).

Por otro lado, las estrategias blandas están relacionadas con la planificación de la protección indirecta frente al riesgo de inundación, como la mejora de los códigos de construcción, incluyendo, por ejemplo, materiales de protección frente a inundaciones húmedas, protección frente a inundaciones secas, o la habilitación de sistemas de flotación y/o subida de las viviendas (Aerts et al., 2014; de Ruig et al., 2019; M.V. & Philip, 2022; Rivera Campos & Tendero Caballero, 2021). Estas medidas están

dirigidas a proteger la propiedad individual, mientras que los humedales artificiales, que corresponden a terrenos ganados al mar (mediante la recuperación de arena) (Kim, 2020a), y los distintos tipos de viviendas resilientes inundaciones, las cuales de acuerdo con la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias de EE. UU. y el Consejo de Diseño de la Construcción de Canadá, para que una vivienda sea menos vulnerable a una inundación costera, debe tener ciertas características (American Society of Civil Engineers, 2014; Coulbourne et al., 2021). Como la Altura, la vivienda debe estar construida a una altura adecuada para evitar que el agua de la inundación entre en la casa. La altura de la vivienda debe ser mayor que la altura del nivel de inundación esperado. Además, el diseño de la vivienda debe ser adecuado, con ventanas y puertas resistentes al viento y tener un sistema de cierre hermético para evitar que el agua entre en la casa. Los Materiales de construcción deben ser resistentes al agua y al viento. La vivienda debe tener un sistema de drenaje adecuado que permita que el agua fluya lejos de la casa. Esto puede incluir canales de drenaje, sistemas de bombeo o un terreno elevado y finalmente la ubicación de la vivienda es importante para evitar las inundaciones costeras. La vivienda debe estar construida en una zona elevada o en una colina para evitar que el agua se acumule alrededor de la casa.

En cuanto a la escala de coste-beneficio de la Figura 2-12, es el elemento de evaluación económica propuesto por Aerts et al., 2014, el que estima tanto la inversión inicial como el coste de mantenimiento de cada solución de la figura 2-12. Los beneficios se expresan como una reducción en el daño anual esperado del sitio evaluado, si la relación coste-beneficio  $> 1$ , entonces el VAN (valor actual neto)  $> 0$  y que la estrategia es económicamente atractiva (Du et al., 2020). En todas las estrategias mostradas en la Figura 2-12. los beneficios acumulados pueden recuperar los costes totales (es decir, la inversión inicial y los costes de mantenimiento).

El riesgo de inundación puede reducirse en gran medida mediante estrategias de protección duras (por ejemplo, barreras contra mareas meteorológica). En comparación, las estrategias blandas (p. ej., recuperación de humedales, viviendas resilientes a inundaciones) tienen una mayor relación coste-beneficio, pero dan lugar a un mayor riesgo residual. Por otro lado, una estrategia híbrida que combine elementos de estrategias duras y blandas puede ofrecer buenos resultados en términos de reducción del riesgo futuro y una mayor relación coste-beneficio (Du et al., 2020), Pero observando la Fig. 12 se establece que el mayor coste-beneficio puede darse de la mano de soluciones blandas que provienen tanto soluciones en materialidad como en

estrategia de construcción de viviendas (Du et al., 2020). Mientras que las medidas relacionadas con la recuperación de tierras redirigidas a zonas de construcción antropogénica han provocado una reducción significativa del hábitat natural. Esto, combinado con las actividades económicas asociadas a la construcción masiva, puede llevar a la contaminación de todo el ecosistema costero (Y. Zhang et al., 2020), por lo que este tipo de soluciones blandas no son tan recomendables de utilizar. Por lo que se analizará, las soluciones con distintas tipologías de viviendas.

Esto se puede comenzar con viviendas flotantes, que van desde estructuras simples hasta casas de lujo con todas las comodidades modernas. Algunas casas flotantes son pequeñas y compactas, mientras que otras son grandes y espaciosas (Laturnus, 1986). Las casas flotantes también pueden ser permanentes o móviles, lo que significa que pueden ser trasladadas de un lugar a otro. Las casas flotantes se construyen típicamente en una plataforma flotante, que puede ser de madera, metal o fibra de vidrio. Las casas flotantes también pueden estar conectadas a una red eléctrica y de agua, o pueden ser autosuficientes con paneles solares y sistemas de recolección de agua de lluvia (Poulsen Rydborg et al., 2019).

En este capítulo se analizaron 1.386 artículos sobre LUM-CC buscados en la plataforma WoS entre 1987 y 2020. Se identificaron las principales áreas temáticas, autores destacados y países donde se realizó la mayor parte de la investigación relacionada con LUM-CC. Se encontró que el riesgo de inundación debido al aumento relativo del nivel medio del mar es un tema predominante en todos los periodos analizados. La evolución de las palabras clave en la literatura científica analizada muestra la necesidad de explorar modelos proactivos de adaptación a esta nueva realidad climática para reducir las inundaciones a largo plazo, considerando factores técnicos, administrativos, económicos y sociales. Además, la acción humana agrava la pérdida de ecosistemas y genera problemas ambientales, económicos y sociales, lo que hace que el estudio de estuarios y humedales sea importante en el contexto de LUM-CC. La gestión del riesgo de inundaciones costeras cerca de los humedales requiere estrategias viables a nivel económico y social, considerando la incertidumbre de las condiciones climáticas futuras y los fenómenos extremos. Por lo que este capítulo destaca la importancia de abordar el riesgo de inundaciones costeras y desarrollar estrategias efectivas y sostenibles para adaptarse a los nuevos escenarios climáticos.

## **Capítulo 4. Respuesta del humedal micromareal del Río Valdivia a la subida del nivel del mar y al hundimiento por terremotos**

La Convención Ramsar tiene una definición muy amplia de humedales, que incluye áreas de marismas, pantanos, turberas y superficies cubiertas de agua, tanto naturales como artificiales, permanentes o temporales, con agua estancada o corriente, dulce, salobre o salada (Astrálaga, 2006).

Los humedales son altamente productivos y se encuentran entre los ecosistemas más diversos del mundo. Son fuentes de agua y productividad primaria, en las que muchas especies vegetales y animales dependen para sobrevivir. Los humedales sustentan altas concentraciones de especies de aves, mamíferos, reptiles, anfibios, peces e invertebrados (Blanco, 2019).

Los humedales no solo son importantes por su biodiversidad y productividad, sino que también traen numerosos beneficios a su entorno. Por ejemplo, son fundamentales para el control de la turbiedad, la erosión del margen litoral y las inundaciones, lo que los convierte en un ambiente clave en la prevención de desastres naturales (Mannucci et al., 2022).

En los últimos años, se ha percibido que los humedales en las latitudes medias son particularmente vulnerables a los cambios ambientales, llevando a que su superficie haya disminuido considerablemente en las últimas décadas, debido a diversos factores, como el cambio climático y las actividades humanas (Zhao et al., 2018). En primer lugar, se ha observado que el cambio climático influye en la distribución de los humedales, ya que afecta los procesos hidrológicos y biogeoquímicos, además de cambiar indirectamente la temperatura del suelo y la dinámica de su vegetación (Helbig et al., 2017; House et al., 2016). Por otro lado, los efectos antropogénicos que se pueden mencionar sobre los humedales corresponden al desarrollo urbano descontrolado (Ruiz-Luna & Berlanga-Robles, 2003) y la implementación de suelos agrícolas y ganaderos sobre ellos (Gedan et al., 2009). El proceso de adaptación al cambio climático en las ciudades costeras, como la subida del nivel del mar, requiere una planificación estratégica y adaptativa del desarrollo urbano. Esta planificación debe tener en cuenta la gestión del uso del suelo y los patrones de ocupación de terrenos costero. (Abadie et al., 2020; Lorie et al., 2020).

A medida que los efectos del cambio climático se aceleran, cada vez son más frecuentes e intensos los eventos meteorológicos extremos (inundaciones, lluvias intensas y marejadas ciclónicas y sequías) (Rosenzweig et al., 2011) que afectan a las marismas saladas y humedales costeros. Justamente, uno de los efectos del cambio climático sobre los humedales costeros que se está estudiando actualmente es el aumento de la temperatura y los cambios en la tasa de aumento en el nivel del mar, la eutroficación y sequías (caso de Doñana y su entorno en España, ver (Díaz-Delgado, 2006)), que pueden disminuir la capacidad del humedal para retener el carbono afectando a la preservación de la materia orgánica (Mueller et al., 2018). Esto es relevante, ya que se estima que entre el 0,2 y el 4,6 % de la población mundial se se quede por debajo del nivel medio del mar en 2100, unos 25–123 cm del aumento medio global del nivel del mar (Hinkel et al., 2014). Es fundamental tener conciencia del riesgo climático en las zonas costeras y comprender precisamente sus efectos sobre los ecosistemas, y la cuantificación del riesgo e incertidumbre para mejorar la resiliencia de las comunidades costeras (Kim, 2020a). En este sentido, el uso de modelos predictivos es de gran ayuda para establecer la sensibilidad de los ecosistemas frente a los cambios en los forzamientos ambientales y acotar la incertidumbre de las predicciones.

Los modelos predictivos permiten acotar la incertidumbre de las predicciones, que ayudan a la comprensión de procesos complejos (Zhou et al., 2017). Hay trabajos vinculados al transporte de partículas, como los que estudian el transporte y calidad de los sedimentos (Pozo et al., 2011) y los que analizan pequeños organismos y su distribución espacial en un cuerpo de agua (Giesecke et al., 2017). Por ejemplo, el trabajo desarrollado por Marani et al., (2010), considera las características de la marea a la que está expuesta el humedal, la concentración de sedimentos en suspensión, tasa de sedimentación orgánica e inorgánica. Este modelo fue adaptado por D'Alpaos et al., (2011), el cual incluye ciertas simplificaciones al modelo analítico planteado por Marani et al., (2010), conservando los procesos biogeomórficos que rigen la evolución vertical de estos ecosistemas, obteniendo una representación analítica de la dinámica de estas biotas, frente a los cambios en la concentración de sedimentos suspendidos y en la tasa de aumento relativo del nivel del mar.

A lo largo de Chile, la actividad sísmica en zonas de marismas cosera, influye en el nivel relativo de mar. Esto por la por la interacción y subducción entre la placa de Nazca y la Sudamericana, donde la primera se está instalada bajo la segunda (Kendrick et al., 2003), generando eventos sísmicos denominados interplaca e intraplaca. En la región de los Ríos, además se incluyen terremotos de tipo cortical,

debido a las fallas superficiales ubicadas en Liquiñe-Ofqui (Astroza et al., 2002). Justo en el tiempo transcurrido desde la llegada de los conquistadores españoles (aproximadamente en 1500 d.C.;(Lomnitz, 2004)) se han producido cuatro grandes terremotos en las cercanías de la ciudad de Valdivia, de los cuales destaca el que se produjo en 1960. El terremoto, que alcanzó una magnitud de 9,5 en la escala de Richter, produjo un hundimiento tectónico de 2,5 m (Plafker & Savage, 1970; Barrientos et al., 1988) que provocó importantes cambios en la fisiografía y en las condiciones hidrográficas de los estuarios del sur de Chile.

En cuanto a la búsqueda de bibliografía que vincule los fenómenos tectónicos y el cambio del nivel medio relativo del mar, producto del cambio climático, solo se han encontrado algunos en Chile, destacando el elaborado por el gobierno de este país “Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile” Ministerio del Medio Ambiente (Gobierno de Chile, 2019), donde se indica que esta zona terrestre reúne características particulares, donde las consecuencias vinculadas a una subida del nivel del mar, se verán contrapesadas por los descensos de terreno producido por el movimiento de las placas tectónicas, aunque no se indican en qué medida.

Debido esta influencia tectónica, el presente capítulo, tiene como objetivo, cuantificar la evolución del nivel del humedal del río Cruces situado al oeste de la ciudad de Valdivia (Chile), con su relación con la subida del nivel medio relativo del mar y los efectos sísmicos, para ello se propone una extensión del modelo de D’Alpaos et al (2011) que permita la evaluación de los fenómenos de subsidencia debido a los sismos.

## **4.1 Materiales y métodos**

### *4.1.1 Área de aplicación del modelo*

La zona de investigación comprende una superficie de 4.892,22 ha, ubicado en las comunas de Mariquina y Valdivia, región de Los Ríos, sur de Chile (Figura 3-1). El origen del humedal está en el descenso de los terrenos asociados a los cursos de agua y su posterior inundación como consecuencia del terremoto de mayo de 1960 que afectó al sur de Chile (CONAF, 2016).

#### 4.1.2 Marea astronómica

Para ajustar los resultados del trabajo a la zona específica de estudio, se emplearán los datos obtenidos por el (Ministerio de Obras Públicas, 2017), para el periodo de Marzo – Mayo del año 2017. Realizando una comparación con los datos de la estación ubicada en la bahía de Corral y que nos entregó el régimen mareal del río Valdivia (Tabla 1) con la estación ubicada en el sector Las Mulatas, emplazada en el entorno del río Cruces. Los registros de las lecturas obtenidas en la estación las Mulatas, indican que las pleamares alcanzan una altura máxima respecto del nivel medio de 1.90 m, la altura promedio 1.32 m y la altura mínima 0.74 m. Lo que se coincide que con lo indicado en el capítulo 3.2, para lo medido entre el 2 de enero de 2012 hasta el 31 de enero de 2018.

#### 4.1.3 Aumento relativo del nivel del mar

Se utilizarán datos locales del mareógrafo ubicado en la bahía de Corral (ver en Figura 1), otorgada por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), en donde se realiza un seguimiento del cambio del nivel del mar desde el año 1985 hasta 2018, donde se estima que existe una disminución promedio de -1.9 mm/yr.

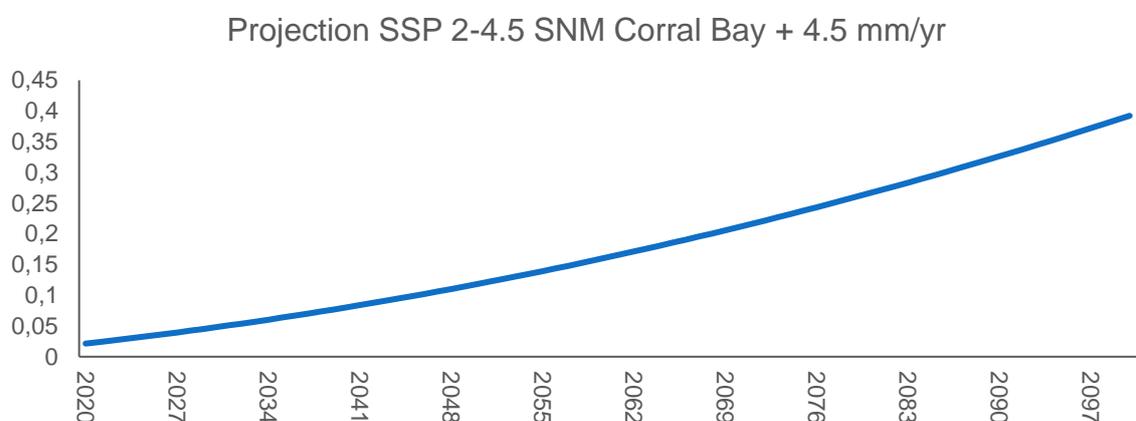
Para la siguiente etapa del trabajo en la cual se analiza las variaciones del NMM sobre la altura de la marisma, será necesario contar con proyecciones de la subida del nivel medio del mar. Por ello se utilizan los datos proporcionados por el “Sea Level Projection Tool” (NASA, 2021; IPCC, 2021). Estos son llamados escenarios básicos y describen a continuación en la Tabla 4-1.

**Tabla 4-1: Escenarios básicos (IPCC, 2021).**

Escenario	Descripción
<b>SSP1-1.9</b>	Mantiene un alza de 1.5°C por sobre de la T° de 1850-1900 en el año 2100, con emisiones netas de CO <sub>2</sub> de 0 a mediados de siglo.
<b>SSP1-2.6</b>	El alza se mantiene debajo de los 2.0°C sobre la T° de 1850-1900 en el año 2100, con emisiones netas de CO <sub>2</sub> de 0 a mediados de siglo.
<b>SSP2-4.5</b>	Se considera un alza de alrededor de 2.7°C, por sobre de la T° de 1850-1900 en el año 2100, considerando que varios países adoptan objetivos de emisión neta 0 al 2050.
<b>SSP3-7.0</b>	Resultado de ninguna política climática adicional en el contexto de desarrollo socioeconómico SSP3. No considera emisiones específicamente altas de CO <sub>2</sub> , pero sí altas emisiones de aerosoles.

<b>SSP5-8.5</b>	Corresponde a la vía de desarrollo socioeconómico con combustibles fósiles.
-----------------	---

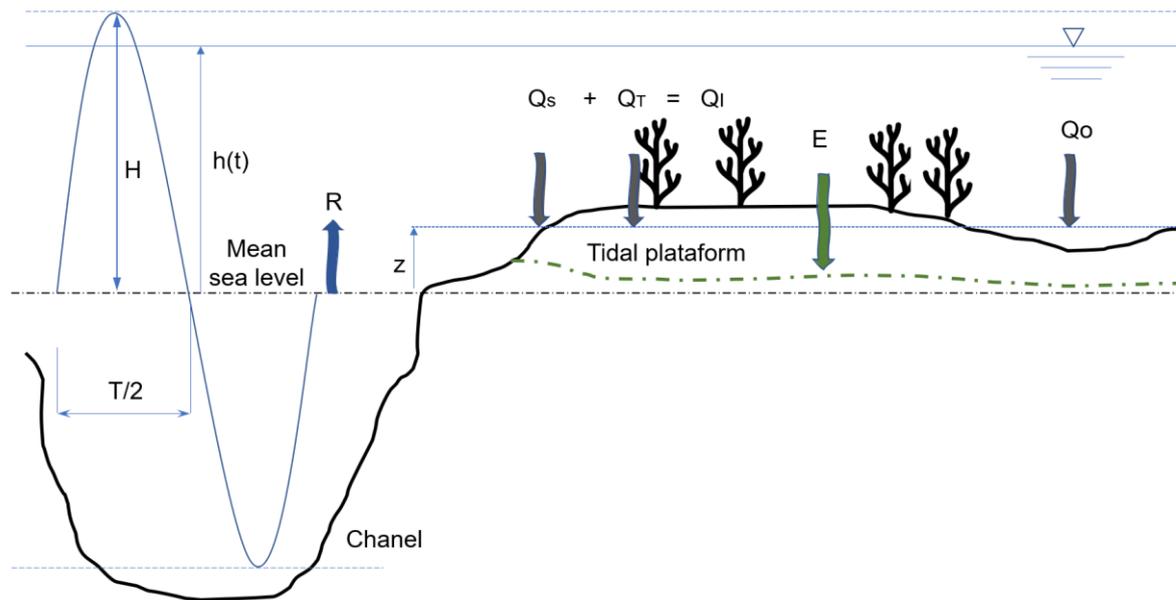
En el caso particular de este estudio se utiliza el SSP2-4.5, en el cual se considera Se considera un alza de alrededor de 2.7°C, por sobre de la T° de 1850-1900 en el año 2100, considerando que varios países adoptan objetivos de emisión neta 0 al 2050, correspondiente a un escenario moderado. Esto implica que el nivel medio del mar en la ubicación del mareógrafo de la bahía de Corral sigue una tendencia como la mostrada en la Figura 4-2. Esta serie se empleará en este trabajo para las proyecciones de la variación de la altura de la marisma y su posibilidad de ahogamiento.



**Figura 4-1: Proyección de la variación del nivel medio del mar, del escenario SSP2-4.5 entre el año 2020 y 2100.**

## 4.2 Modelo idealizado de elevación de la marisma

El modelo matemático está basado en el análisis numérico realizado por D’Alpaos et al., (2011), que describe la evolución temporal de la elevación de una marisma. El modelo se describe con la Figura 4-3.



**Figura 4-2: Bosquejo de los flujos de sedimentos en la superficie de la marisma. Adaptado de (Marani et al., 2010)**

$$\frac{dz}{dt} = Q_D - Q_E - R - E \text{ (Ec. 4-1)}$$

donde  $Q_D$  corresponde a la tasa de sedimentación,  $Q_E$  es la tasa de erosión,  $E$  corresponde a los cambios por subsidencia sísmica y  $R$  es la tasa relativa del aumento del nivel del mar. Se incorpora el término  $R$  debido a que la elevación se calcula con respecto al nivel medio del mar. El término  $R$  incluye en este trabajo la subida del nivel del mar por cambios eustáticos. La tasa de sedimentación es modelada como la suma de la sedimentación por la velocidad de caída del sedimento ( $Q_s$ ), la captura de partículas en los tallos y hojas de las plantas ( $Q_c$ ) y las tasas de sedimentación orgánica ( $Q_o$ ), de esta forma se considera la producción orgánica y la sedimentación inorgánica.

No se consideraron los flujos de erosión sobre la plataforma del humedal se considera que las corrientes de marea son generalmente demasiado débiles para erosionar la superficie del humedal con vegetación y la erosión eólica es insignificante debido al efecto combinado de la reducción de la profundidad del agua sobre la plataforma, la presencia de las plantas halófitas que protegen la superficie contra la erosión generada por las corrientes.

Según D'Alpaos et al., (2011) la tasa de sedimentación se puede expresar según la Ec.4-2, como una función lineal decreciente de la elevación del humedal MSL ( $z=0$ ) y MHL ( $z=H$ )

$$Q_D(z) = \alpha_T \left(1 - \frac{z}{H}\right) + \gamma_0 \left(1 - \frac{z}{H}\right) \text{ (Ec. 4-2)}$$

donde  $\alpha_T$  es la tasa máxima de acumulación (sedimentación) inorgánica,  $\gamma_0$ : Tasa máxima de acumulación (sedimentación) orgánica, H: Amplitud de marea m,

Además, el primer término del lado derecho representa la tasa de sedimentación inorgánica y el segundo término la tasa de sedimentación orgánica. En cuanto a la especie vegetal imperante en el humedal, corresponde a spartina Alterniflora, predominante en el continente Americano y parte de Europa y las costas Atlánticas de África, se desarrolla principalmente en ecosistemas salinos, con un comportamiento semiacuático (del Rocío et al., 2015). Para el análisis se considerará que las características de la especie spartina Alterniflora son afines con las que posee la especie scirpus Californicus, debido al entorno en el que estas se desarrollan. Es por ello por lo que, al optar por esta simplificación de los parámetros, los resultados aproximados del modelo podrían tener ciertas diferencias con respecto al usar parámetros que sean definidos para la especie a estudiar del humedal. Sin embargo, por la similitud de las especies no se considerará el margen de error.

Sobre la base de las simplificaciones de la Ec. 4-1, realizadas por D'Alpaos et al., (2011), dentro de las que se consideraron, el flujo orgánico,  $Q_O$ , disminuye linealmente con la elevación del pantano y se supone que es proporcional a la biomasa seca de la planta aérea promediada anualmente. La biomasa de Spartina se expresa como una función linealmente decreciente de  $z$  entre MSL y MHT. El parámetro  $\gamma_0$  depende de las características de la vegetación, mientras que existe una disminución lineal del flujo orgánico,  $Q_O$ , con la elevación del pantano y la relación de la deposición total de sedimentos,  $Q_D$ , con la elevación,  $z$ :

$$\frac{dz}{dt} = -\frac{k}{H}z + k - R - E \text{ (Ec. 4-3)}$$

Así, se obteniéndose la ecuación Ec. 4-3, donde, R: Tasa de aumento relativo del nivel del mar en mm/yr, es una serie temporal determinada a partir de la series pronosticadas a 2100 de nivel de mar (Figura 4-2), E: series de cambios en la elevación del terreno por subsidencia sísmica (cómo se generan estas últimas se

describe en el siguiente apartado) y  $k$ : Tasa máxima de acumulación total sobre la plataforma del humedal,  $k = \alpha_T + \gamma_0$

Un caso particular de la Ec. 4-3 ocurre para obtener la elevación de equilibrio del humedal, es decir,  $dz/dt=0$ :

$$z_0 = H \left( 1 - \frac{R_0}{k_0} \right) \text{ (Ec. 4-4)}$$

Esta Ec. 4-4, corresponde a la altura de la superficie del sedimento acumulado en la marisma, constituido por materia orgánica y atrapamiento inorgánico, que depende de la interacción entre el nivel del mar, la elevación de la tierra y la acumulación de sedimentos por partes de la vegetación de la marisma (Morris et al., 2002), donde,  $z_0$ : Altura inicial de equilibrio m,  $R_0$ : Tasa de aumento relativo del nivel del mar mm/yr,  $k$ : Tasa máxima de acumulación total sobre la plataforma del humedal,  $k_0 = \alpha_T + \gamma_0$ . Esta expresión permitirá, tener un valor inicial de humedal para el análisis en el año 2020, suponiendo además una subsidencia  $E_0 = 0$  m.

En este trabajo, el desarrollo de este modelo matemático se realizará mediante el Software Python, que proporciona soluciones numéricas para la evolución en el tiempo de las elevaciones de los humedales y de las tasas de acreción relativa para diferentes condiciones de marea, cambio en el nivel del mar y subsidencia.

### 4.3 Generación de series de subsidencia del terreno

Atendiendo al documento de Valdebenito & Ortega (2020), se asume que la aparición de sismos de una determinada magnitud en la región de Los Ríos siguen una distribución estadística de Poisson a lo largo de tiempo y una distribución espacial homogénea en cada fuente de área y un modelo característico para las fuentes de la falla (Ec. 4-5) :

$$\Pr(A > a | T_j) = 1 - \prod_{k=1}^N \prod_{i=1}^{N_m} \sum_{s=0}^{N_s} P_k(s, M_i, T_j) [\Pr(A \leq a | M_i, R_k)]^s \text{ (Ec. 4-5)}$$

La Ec. 4-5 de (Gutenberg & Richter, 1945), indica que en las fuentes distribuidas espacialmente ( $k = 1, \dots, N$ ) hay terremotos de varias magnitudes ( $M_i, i = 1, \dots, N_m$ ),  $N_m$ , Magnitud máxima del sismo, las probabilidades de ocurrencia de terremotos en los marcos temporales conocidos  $T_j$  en la fuente  $k$  son dadas por  $P_k(s, M_i, T_j)$ , es decir, la

probabilidad de que se produzcan  $s$  eventos ( $N_s$ , número máximo de eventos) de magnitud  $M_i$  en los próximos años  $T_j$  en la fuente  $k$  (Valdebenito & Ortega, 2020).

Asimismo, en el documento de Valdebenito & Ortega (2020), la distribución de la longitud de intervalos temporales entre sismos de la misma magnitud sigue una función de probabilidad exponencial (Eq. 4-6), que contiene una variable aleatoria continua y mide el paso del tiempo,

$$e(x) = \frac{1}{\lambda} e^{-\frac{1}{\lambda}t} \quad (\text{Ec. 4-6})$$

donde  $\lambda$  es el tiempo promedio de espera histórico y tiene una media y una desviación típica de  $1/\lambda$ , determinando la probabilidad de que algún evento ocurra en los próximos  $t$  años (Ec 4-7).

Es posible utilizar los datos de la Tabla 4-2 para determinar los periodos de retorno entre sismos de una misma magnitud y simular a la misma vez todos los sismos que tendrían lugar en una proyección a horizonte 2100.

$$t = \frac{\log(1-p(t))}{-\lambda} \quad (\text{Ec. 4-7})$$

siendo  $t$  el tiempo y  $p(t)$  la probabilidad de sucesos independientes. Estos procesos de Poisson homogéneos no tienen memoria por lo tanto se pueden simular con métodos de Monte Carlo (Peña, 2005) y  $\lambda = 1/T(M)$  (Tabla 2), donde  $T(M)$ , corresponde al periodo de retorno que se desprende del estudio de (Valdebenito & Ortega, 2020). La serie conjunta se obtendría sumando las series para cada magnitud de momento ( $M_w$ ). En la Tabla 4-2 se muestra además los valores de  $\lambda$ . El dato de magnitud 9 Mw se ha obtenido haciendo un ajuste exponencial según Ec. 6 (Valdebenito & Ortega, 2020).

**Tabla 4-2: Ventanas temporales por magnitud de sismos en la región de los ríos producto de movimientos interplaca.**

Magnitud (>Ms)	T (años)	$\lambda$
4	2	0.5000
4.5	5	0.2000
5	9	0.1111
5.5	28	0.0357
6	38	0.0263
6.5	48	0.0208
7	68	0.0147
7.5	98	0.0102
8	218	0.0046

<b>8.5</b>	318	0.0031
<b>9</b>	<b>368</b>	<b>0.0027</b>
<b>9.5</b>	418	0.0024

Para ligar las magnitudes con las subsidencias en la zona de estudio se recurre a los dos eventos sísmicos de los que hay evidencias geológicas de cambio de nivel del mar relativo cuantificadas: el primero en 1960 y el segundo en 2010, cuyas variaciones en el terreno se indican en Tabla 4-3 (Rojas Hoppe & Díez Lorente, 2013).

**Tabla 4-3: Registros de subsidencias de dos eventos sísmicos en la ciudad de Valdivia.**

1960 – Ms=9.5			2010 – Ms=6.9*		
Min (m)	Prom (m)	Max (m)	Min (m)	Prom (m)	Max (m)
1.6	1.8	2	0.4	0.8	1.2

\*Se utiliza la magnitud medida en la ciudad de Valdivia, terremoto de 2010, tuvo una intensidad de 8.8 en su epicentro cercano a la ciudad de Concepción, distante a unos 420 km (Barrientos, 2010). Los valores min y max, corresponden a los registrados in-situ en varios puntos de la zona del terremoto en la ciudad de Valdivia y de ellos se calcula un promedio.

En general sismos menores a 6 grados Richter, del tipo interplaca, no generan cambios perceptibles (medibles y/o significativos) en el terreno (Elnashai & Di Sarno, 2015). Por tanto, se considera una estimación de la relación entre subsidencias y magnitudes, con una función compuesta (Ec. 4-8), como sigue:

$$R_h(M_s) = \frac{5 M_s}{13} - \frac{241}{130}; \quad (\text{Ec. 4-8})$$

con Ms, como la magnitud del sismo en Mw, escala de Richter.

En la Figura 4-4, se pueden observar un ejemplo de la relación entre la magnitud de los sismos y sus respectivas subsidencias.

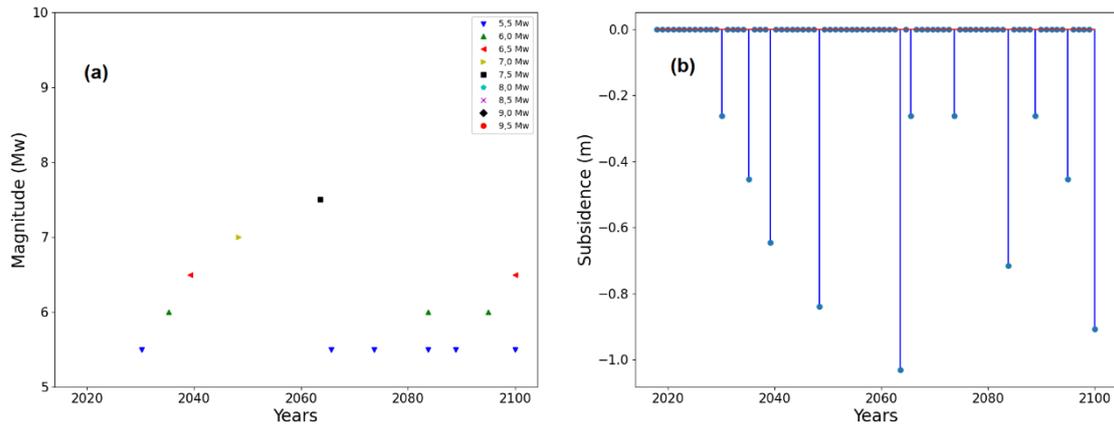


Figura 4-3: Panel (a), Ejemplo de una simulación de terremotos probables en 100 años, panel (b), Subsistencia sísmica asociada a los terremotos del panel a.

#### 4.4 Desarrollo probabilístico

Para organizar y analizar los resultados de manera correcta, es necesario hacer un análisis estadístico de los datos de salida del modelo al año 2100. Este año (2100), corresponde al último de la simulación, por lo que arrastra todos los errores acumulados de la misma. Por lo que se utiliza este año para calcular el error muestral, considerado un intervalo de confianza del 95% y la Ec.4-9:

$$e < z_t * (\sigma / \sqrt{n}) \quad (\text{Ec. 4-9})$$

donde,  $z_t$  es la de Student para el intervalo de confianza,  $\sigma$  la desviación estándar de los datos de salida y  $n$  el número de muestras. Luego, siendo conocido el error, se calculará el número de simulaciones necesarias para que los resultados finales al año 2100, tengan un error menor al calculado.

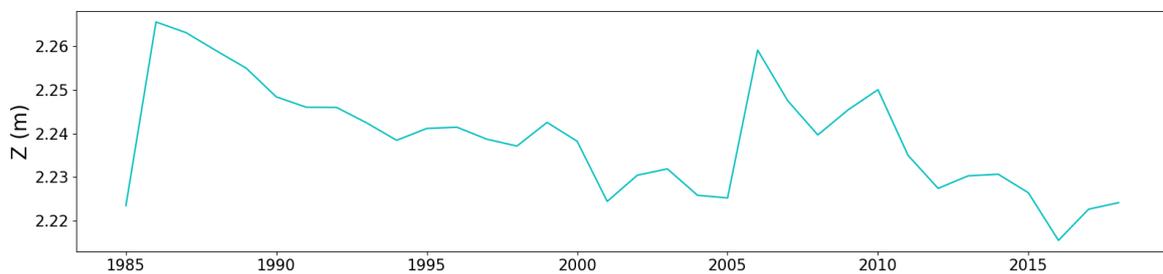
Tomando los valores  $z$  para el año 2100, de  $n$  simulaciones iniciales, se calculará la desviación estándar y la media de los datos de salida. Con esto y aplicando la Ec. 4-10, se podrá determinar el número de simulaciones.

$$n > (z_t * \sigma / e)^2 \quad (\text{Ec. 4-10})$$

#### 4.5 Resultados y discusión

##### 4.5.1 Altura del humedal con R variable y sin sismos (1985-2018)

Inicialmente se estima  $z$  considerando solamente el efecto de las variaciones en el NMM, para poder determinar las alturas del humedal asociada a las variaciones reales del NMM en el mareógrafo de Corral, correspondiente al periodo 1985-2018. Primero, es necesario calcular la altura inicial. Para ello se utiliza la Ec.4-4, con los datos de entrada: amplitud de marea astronómica  $H=1.90$  m; concentración promedio de sedimentos de la estación D1-2,  $C_o = 10$  mg/l ;  $R_o = -1,9$  mm/yr;  $\gamma_0=0,0025$  m/yr;  $\alpha_T=8.66$  mm/yr. Estos valores se corresponden con una altura de equilibrio del humedal de  $z_o = 2.22$  m (según la Ec. 4-8). Este valor se emplea como condición inicial para obtener  $z(t)$ . Se calcula  $z$  del humedal, utilizando la Ec 4-3, con las mediciones de la serie temporal para  $R$ , del periodo 1985-2018, y los valores iniciales descritos anteriormente, obteniéndose la gráfica de la Figura 4-5.



**Figura 4-4: Variación de la altura del humedal del río Cruces, en el periodo 1985-2018, considerando solo la variación de R.**

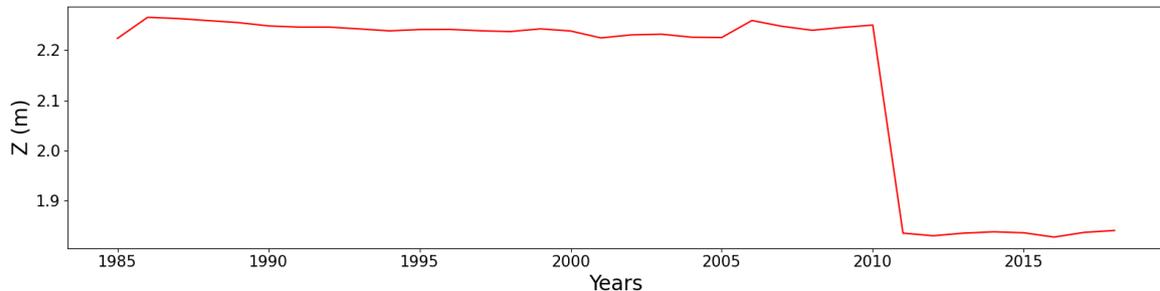
Se puede observar, que altura del humedal varía en el tiempo y está relacionada con los cambios en el NMM en la bahía de Corral. El valor de  $R$  aquí tiene una tendencia de  $-1,9$  mm/yr. La Figura 4-5, muestra que la altura del humedal disminuyó a lo largo del tiempo, llegando a 2018, con una altura del humedal de  $2,224$  m, lo que es ligeramente menor que la altura de equilibrio registrada en 1985, que fue de  $2,266$  m.

Por otro lado, se ha utilizado la Ec. 4-4 para determinar la tasa umbral de aumento relativo del nivel del mar que llevaría al ahogamiento del humedal del río Cruces. Con  $C_o = 10$  mg/L, esta tasa es de  $R=K=6,4$  mm/yr. Sin embargo, al analizar los escenarios SSP del IPCC, se observa que solo en el caso más desfavorable, SSP 5.85, se alcanza una tasa de  $R=6,5$  mm/yr para el año 2100, lo que indudablemente llevaría al ahogamiento del humedal. En los demás escenarios SSP, aunque no se alcanza la tasa umbral, se acercan peligrosamente a ella.

#### 4.5.2 Altura del humedal incorporando la subsidencia del sismo de 2010 (1985-2018)

Sin embargo, hay que señalar que los resultados presentados en la sección 4.5.1, solo han considerado la alteración sobre el humedal producto de  $R$ , pero no ha incluido

cambios en otros parámetros locales, como la ocurrencia de terremotos. Por lo que, utilizando la Ec. 4-8, es posible estimar la altura del humedal con la subsidencia del sismo de 2010, dando como resultado la Figura 4-6, esta muestra un quiebre de la curva de  $z$ , agregando la subsidencia en la zona de estudio 0,4 m.

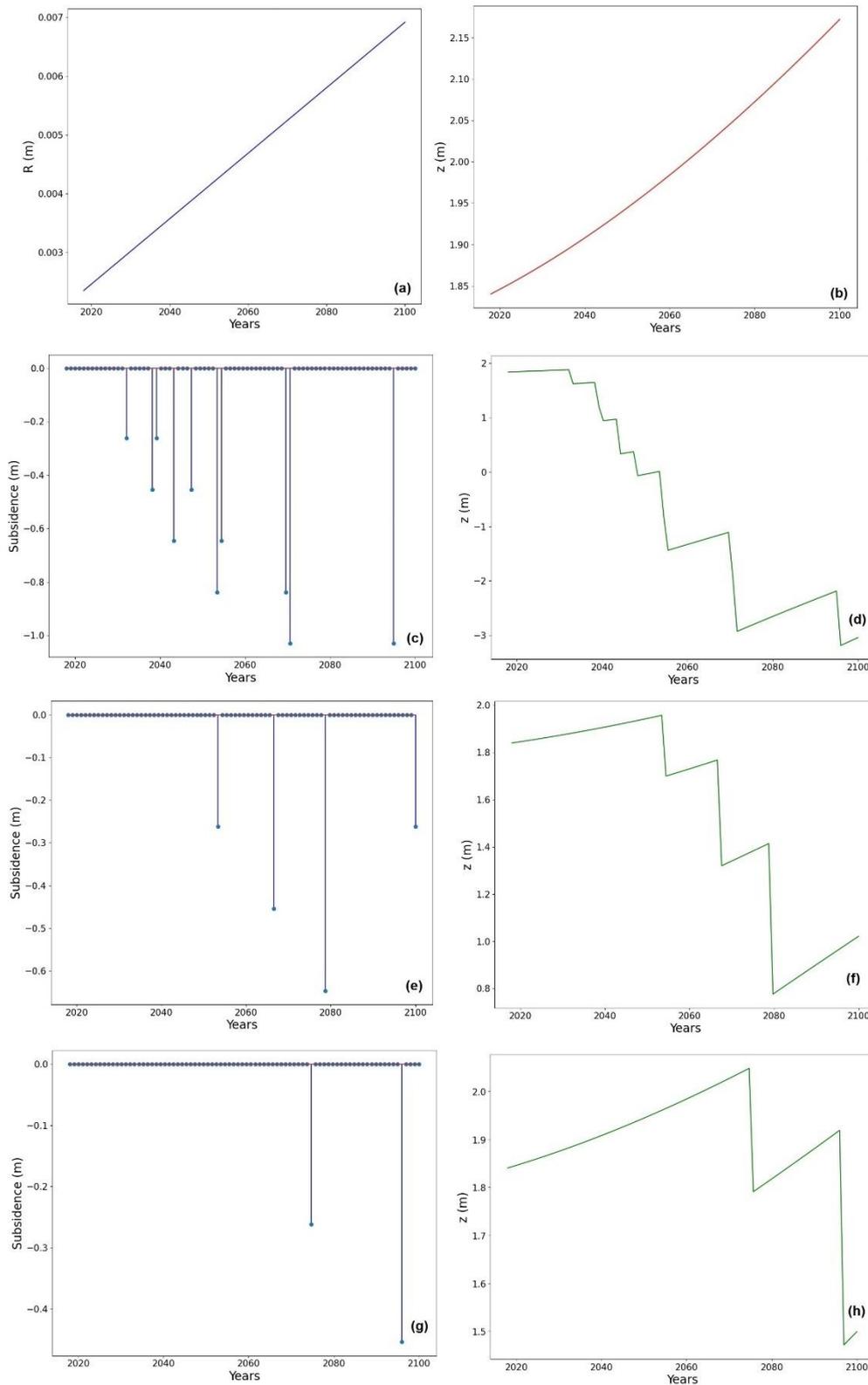


**Figura 4-5: Variación de la altura del humedal del río Cruces, en el periodo 1985-2018, considerando la variación de  $R$ , y la subsidencia promedio del terremoto de 2010.**

Se puede observar que  $z$ , cambia drásticamente para el año 2010, lo que influye en la altura de 2018 con 1,84 m, inferior a lo presentado en la figura anterior. Este cambio indica la importancia de incorporar la variable sísmica, para proyectar de manera correcta la altura de equilibrio en la zona de estudio.

#### 4.5.3 Generación aleatoria de sismos para una línea temporal de 100 años en la zona de estudio.

Ahora, utilizando lo descrito en la sección 2.3, con las ecuaciones de probabilidad de ocurrencia de sismos (Ec 4-6 y Ec.4-7), es posible modelar eventos aleatorios para la zona de estudio a horizonte 2100, siguiendo la distribución temporal de la Tabla 4-2. Lo que da como resultado, distintos escenarios de terremotos para zona de estudio, con magnitudes que van desde 5,5 a 9,5 Mw. Ahora bien, si realizamos distintas iteraciones en el programa, podríamos obtener diferentes escenarios posibles para la zona de estudio, por ejemplo, en la Figura 4-7, se tienen, tres simulaciones distintas, con magnitudes sísmicas entre 5,5 Mw y 8,0 Mw. Los cuales a su vez generan cambios en el terreno, específicamente, subsidencia, las que se han modelado siguiendo la Ec. 4-3. lo que a su vez genera cambios en la proyección de alturas del humedal.

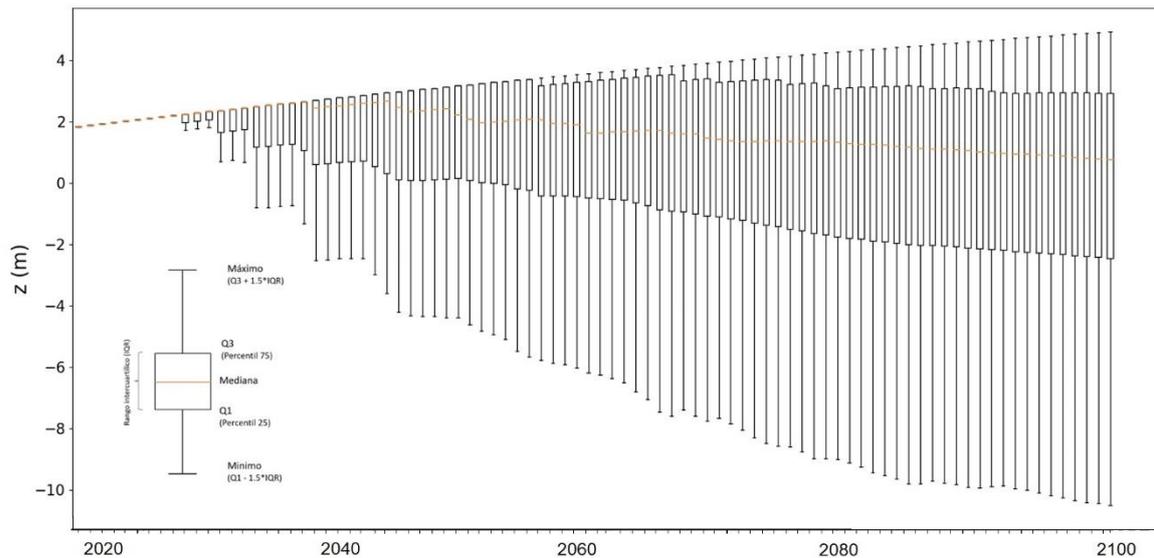


**Figura 4-6: Variados resultados para tres simulaciones del programa (a) variación del nivel medio para escenario SSP2-4.5, (b) altura del humedal sin considerar subsidencias, (c) subsidencias simulación N° 1, (d) altura del humedal considerando subsidencias de simulación N°1, (e) subsidencias simulación N° 2, (f) altura del humedal considerando subsidencias de simulación N°2, (g) subsidencias simulación N° 3, (h) altura del humedal considerando subsidencias de simulación N°3**

Las subsidencias de la Figura 4-7, nos permiten indicar que estos cambios en el terreno provocados por los sismos pueden alterar sustancialmente la altura del humedal, cambiando totalmente los resultados de una proyección de  $z$  sin esta variable. Por ejemplo, si consideramos, la Figura 4-7 b, la altura  $z$  del humedal sería de  $z=2.27$  m, la cual considera solo la variación del nivel medio del mar para el escenario SSP 2-4.5, y la comparamos con los casos de subsidencias (Figura 4-7 d-f-h), nos encontramos ante escenarios completamente diferentes.

Aquí, la altura final del humedal está totalmente sometida tanto a las variaciones de  $R$ , como a las subsidencias de esta modelación, generando una altura del humedal para el final del periodo de análisis de  $z=-2,8$  m. Provocando un cambio total del humedal, incluso mayor que lo descrito por el SSP 5-8.5.

Lo presentado anteriormente, corresponde solo a tres realizaciones de todas las posibles, por lo que es necesario ejecutar y analizar los efectos de  $N$  realizaciones para generar cierto grado de certidumbre. Para ello es necesario establecer, cuál será el error (Ec. 4-9) e intervalo de confianza que se utilizará para los cálculos. Se plantea un error menor a 10 cm, con un intervalo de confianza del 95%, lo que nos arroja un valor de 0.064. Ahora, siendo conocido el error muestral, se calculará el número de simulaciones con la Ec. 4-10. Lo que da como resultado  $n > 16.581$  iteraciones. Por lo que adoptamos  $N = 20.000$ . Ahora al repetir la simulación 20.000 veces, se calculan los valores, mínimos, máximos y mediana a horizonte 2100, así como los percentiles 25 y 75, los cuales se pueden observar en la Figura 4-8, donde se crea una caja desde el primer cuartil hasta el tercer cuartil, también hay una línea vertical que atraviesa la caja en la mediana desde el valor mínimo al máximo por año de simulación.



**Figura 4-7: Proyección de la altura del humedal máxima, mínima, mediana y cuartiles 25-75, de 100 años. para 2000 simulaciones.**

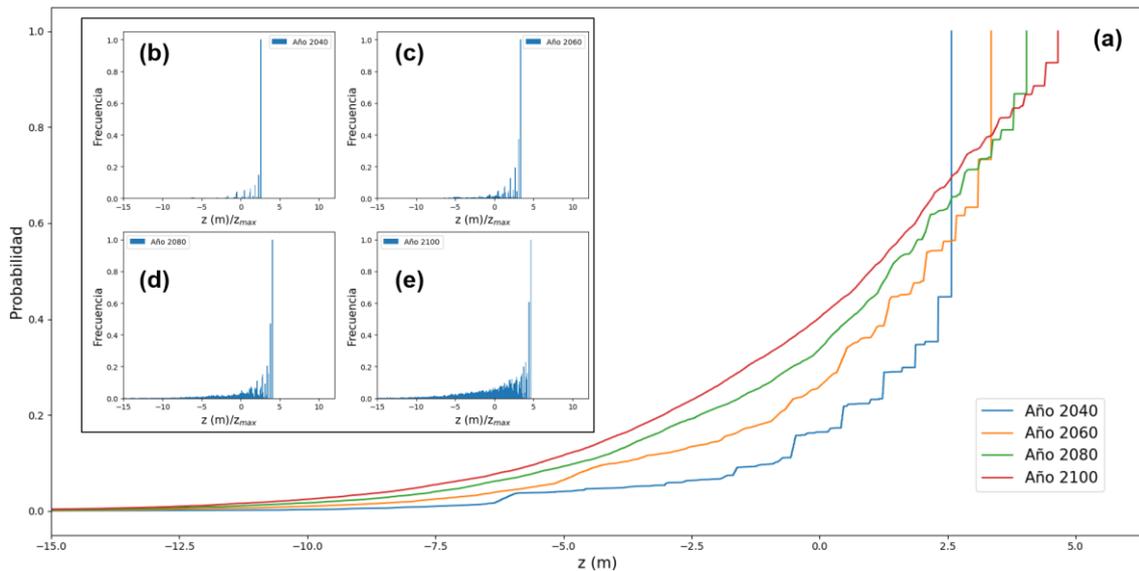
Observando la Figura 4-8, podemos ver los dos extremos de posibilidades que se pueden dar en nuestro estudio, por una parte, si ocurrieran terremotos todos los años y en más de una oportunidad, se podrían generar subsidencias todos los años de análisis, lo que provocaría que la altura del humedal decaiga considerablemente (línea baja del cajón), esta condición impide un asentamiento para la altura de equilibrio del humedal, lo que llevaría a un ahogamiento del mismo. En el otro extremo, los valores máximos (línea alta del cajón), es sobre el supuesto que no se genera terremoto en los 100 años de simulación, lo que implica que la altura del humedal solo dependería de R, lo que conllevaría a una altura de humedal final de 4.94 m, muy por encima de los 1.84 m con los que inicia la simulación.

Finalmente, la línea de la mediana de z (anaranjada), nos muestra que la generación de los sismos de mayor magnitud no es habitual, por lo que genera solo subsidencias de menor tamaño, las cuales disminuyen la proyección de altura final del humedal a 0.78 m para el último año de simulación, lo que representa una caída del 42,4% de la altura inicial del humedal.

Ahora, revisando los distintos percentiles de z, en la Figura 4-8, podemos observar que el percentil P25, entrega un escenario muy desfavorable para la altura del humedal, con un decrecimiento sostenido de z a lo largo de los 100 años de simulación hasta una profundidad de -2.45 m, ahogando el humedal. Por el contrario, el percentil 75, presenta una proyección al alza de z, lo cual es concordante con que la generación de terremotos es poco usual para un universo temporal de 100 años, lo que provoca en su mayoría sismos de menor intensidad, generando menores

subsidiencias. Para este percentil (P75), la proyección de  $z$ , para el año 2100 es de 2,92 m, muy cercano al valor máximo con ningún terremoto.

Luego de hacer un análisis estadístico de los resultados para toda la línea temporal de 100 de simulación, se procede a revisar en concreto, 4 años para la comparación. 2040, 2060, 2080 y 2100. De los cuales, se presentan las funciones de densidad acumulada e histogramas de resultados de  $z$ . en la Figura 4-9 (a-e).



**Figura 4-8: (a) Función de distribución de probabilidad de la proyección de la altura del humedal para los años 2040, 2060, 2080 y 2100. Histogramas de la proyección de la altura normalizada del humedal para los años (b) 2040, (c) 2060, (d) 2080, (e) 2100. Todas para 20 mil simulaciones.**

Si se observa la función de distribución, se ve que más del 50% de los valores en el año 2040 dan el mismo valor (2,56 m) y mientras que, en el año 2060, el 25% de los valores de  $z$ , también tiene el mismo valor (3,35 m). Según los resultados presentados en la simulación, la elevación final del humedal dependerá del momento en que ocurra el terremoto. Si el terremoto ocurre más pronto, la elevación final del humedal será menor, ya que se generarán subsidiencias más temprano y en más oportunidades, lo que provocará que la altura del humedal decaiga considerablemente. Por otro lado, si el terremoto ocurre más tarde, la elevación final del humedal será mayor, ya que se generarán subsidiencias menos frecuentes y de menor magnitud, lo que permitirá que la altura del humedal se mantenga más estable y cerca de la altura de equilibrio.

En cuanto a las Figura 4-9(b-e), se observa que, para el histograma del año 2040, más del 80% de los datos están comprendidos en  $z$  de 1,2 y 2,4 m. mientras que alturas negativas en este año, no alcanzan el 20%, concentrándose en torno a -1,2 m. Esto habla, que la variación de  $z$  para los primeros 20 años de simulación no están significativa, y tiende adoptar valores cercanos al 1,8 m, correspondiente al valor inicial

de z para la simulación. Si observamos el año 2060, el comportamiento es bastante similar, con cerca del 75% de datos con alturas positivas y 25% de valores negativos. Pero al revisar el comportamiento del año 2080 y 2100, hay una distribución de alturas más uniforme, (66-44%, 60-40%, 55-45%, respectivamente), con la aparición de valores extremos, principalmente negativos.

Analizando estos resultados, y comparándolos con otros en la zona de estudio (Hauenstein and Ramirez, 1986; Delgado et al., 2014) hablan que la resiliencia del humedal del Río Cruces, frente a cambios del nivel medio del mar, es muy alta, y coincide con nuestros resultados, ya que, frente a escenarios de SPP 2.45 o 5.85, el humedal logra alcanzar alturas de equilibrio en una línea temporal de 100 años de 0,78 m y solo en las simulaciones, con una alta presencia de sismos (como en la Figura 4-7d) es que el humedal no logra recuperarse y se ahoga en grandes extensiones de su superficie. Esto puede aplicarse en gran parte de los casos con z negativo, sin embargo, en algunas situaciones, un humedal que se encuentra por debajo del nivel medio del mar (NMM) pueda volver a emerger si el nivel del mar disminuye. Esto dependerá de varios factores, como la topografía del área circundante, la permeabilidad del suelo y la disponibilidad de agua dulce. En algunos casos, el agua dulce puede fluir hacia el humedal y mantenerlo inundado a pesar de la disminución del nivel del mar. En otros casos, si la topografía es favorable, el humedal puede drenarse y convertirse en un área seca.

Por otra parte, hay que señalar que en este trabajo solo se ha considerado la subsidencia provocadas por el terremoto, siendo estas el efecto más común en la zona estudio (Rojas, 2010; Rojas Hoppe & Díez Lorente, 2013). Pero si se revisan otros trabajos disponibles del último gran terremoto incluido en el sur de Chile el año 2010, se encuentran grandes elevaciones del terreno en distintas latitudes costeras cercanas al epicentro cerca de la localidad de Tirúa (Barrientos, 2010). Por lo tanto, es importante considerar la variabilidad espacial de los cambios de elevación del terreno en futuros estudios, ya que podría haber algún fenómeno de elevación del terreno en la línea temporal de 100 o más años, lo que probablemente también afectaría la altura final del humedal. Por lo que una opción para futuras investigaciones sería asignar una probabilidad según la información disponible al signo de la subsidencia, es decir, que con una probabilidad “p” el terreno baje y con una probabilidad “1-p” el terreno suba. Lo que ayudaría a tener en cuenta la incertidumbre en los resultados de los estudios.

En este capítulo se analiza cómo el humedal del Río Cruces y Río Valdivia responderá a los cambios previstos del nivel del mar, las concentraciones de sedimentos en suspensión y la subsidencia sísmica local. Se ha utilizado un modelo analítico simplificado desarrollado por investigadores de la Universidad de Padua, adaptado a las características del humedal. Se ha encontrado que la tasa de subida relativa del nivel del mar afecta directamente a la altura de equilibrio del humedal, lo que puede generar una tendencia al ahogamiento. La vegetación existente permite controlar esta altura de equilibrio. Además, el modelo incorpora cambios en el terreno debido a la probabilidad de ocurrencia de sismos, lo que puede producir inundaciones en las comunidades aledañas y ocasionar pérdidas sociales, ecológicas y económicas a largo plazo.

## **Capítulo 5. Proyección de los efectos de la subida relativa del nivel medio del mar sobre la planificación urbana de una ciudad**

Históricamente el control de los recursos hídricos permitió el desarrollo de civilizaciones sólidas y duraderas, tales como Mesopotamia, Egipto, Roma, etc. (Buerkert et al., 2021). En Latinoamérica, si bien existieron grandes civilizaciones precolombinas, el desarrollo de las ciudades desde la llegada de los españoles se basó en la preexistencia de asentamientos y razones estratégicas militares y de comunicación (Hermelin, 2003).

Según la Organización de Naciones Unidas (United Nations, 2022) entre los años 1950 y 2022 la población mundial aumento de 2.500 millones de habitantes a 8.000 millones, proyectando un incremento a 9.700 millones para el año 2050, y alcanzando los 11.200 millones en el año 2100. Chile también ha incrementado su población, según los datos de la Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (del Congreso Nacional de Chile, 2021) entre la población censada el año 2002 y la del año 2017 hubo un incremento del 16%.

En cuanto a la población costera, se estima que el 40% de la población mundial radica en el litoral (FAO, 2011). En específico, el continente americano es el que ha presentado el mayor crecimiento de ciudades y aglomeraciones costeras, aumentando esta cantidad 10 veces entre los años 1945 y 2014, lo que ha significado que la población pase de 20 millones a 180 millones (De Andres & Barragán, 2016). En Chile, la población costera corresponde a un 26% del total (de la Costa, 2021) (es decir, 4.5 millones de personas), como ejemplo de este aumento se tiene el caso de la ciudad de Valdivia, ciudad del sur de Chile, que entre 1987 y 2017 aumento sus áreas construidas en un 61%, aunque ha disminuido su ritmo de expansión en la última década (Verichev et al., 2018).

El aumento sostenido de la población en zonas costeras causa degradación en los ambientes costeros, lo que también afecta a la población que allí reside (Ciampa et al., 2021). Según datos de Barragán y De Andres (De Andres & Barragán, 2016) en América Latina y el Caribe se tiene una media de una ciudad cada 9.000 km<sup>2</sup> en el litoral, mientras que en zonas interiores se tiene una media de una ciudad cada 96.000 km<sup>2</sup>. Esta cercanía a las riberas y costas se ha constituido en una amenaza para el desarrollo de las ciudades debido a diversos factores, como el aumento del nivel del

mar y la urbanización descontrolada, provocando que zonas de bajo riesgo de inundación ahora se vean amenazadas por este peligro (Du et al., 2020).

En cuanto al aumento del nivel del mar, en el *Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* (IPCC, 2022) se reporta que el alza en el nivel del mar global ha sido continuo. Las mediciones observadas para el periodo 1901–1990 corresponden a un aumento de 1,4 mm/año, luego para el periodo 1970–2015 el alza registrada fue de 2,1 mm/año, para nuevamente aumentar a 3,2 mm/año para el periodo 1993–2015 y finalmente, registrar un aumento de 3,6 mm/año para el periodo 2006–2015.

Las zonas costeras serán las primeras en verse afectadas debido al mencionado aumento del nivel del mar provocado por el cambio climático (Pillen et al., 2017). De este modo, se considera que el cambio climático es el principal promotor de las inundaciones costeras (Ciampa et al., 2021), y se prevé que aquel aumentará la frecuencia de eventos extremos en todo el mundo (Vitousek et al., 2017).

En cuanto a la urbanización descontrolada, Hermelin (Hermelin, 2003), señala que la carencia de planificación frente al incremento de la población urbana ha sometido a condiciones de riesgo ante a los fenómenos naturales a una proporción importante de los habitantes. En Chile, en la *Política Nacional de Desarrollo Urbano (de Vivienda y Urbanismo, 2014)* se realizó un diagnóstico sobre la urbanización nacional y se detectó que existe una ineficacia institucional en la administración de las ciudades, una agresión a los sistemas naturales en conjunto con una insuficiencia de herramientas para permitir el desarrollo sustentable. También se detectó que la toma de decisiones del sistema público para el desarrollo urbano se encuentra fragmentada y que la información es escasa, además en la planificación se detectó una desconexión entre la incorporación de ecosistemas y la protección ante riesgos naturales. En el mencionado diagnóstico también se halló que al año 2014 solo el 68% de las comunas estaban cubiertas por los instrumentos de planificación territorial, además, sus tramitaciones, tardan aproximadamente 6 años y tienen pocas facultades para dirigir el desarrollo urbano, lo que da como resultado, que las decisiones de infraestructuras en la mayoría de las ocasiones estén fuera de la planificación, lo que impide la correcta toma de decisiones por parte de la autoridad frente al desarrollo de proyectos de infraestructura o urbanización que pudiesen ser dispuestos en zonas potencialmente inundables.

Este incremento sostenido y en ocasiones descontrolado de la urbanización conlleva un evidente cambio de uso de suelos. Entre los efectos provocados estos cambios, encontramos la impermeabilización del suelo, la cual provoca un aumento de la

escorrentía superficial y reduce la infiltración de agua, disminuyendo así la capacidad de amortiguación frente a las inundaciones (Ciampa et al., 2021).

Además, las zonas inundables o de transición costeras juegan un papel fundamental en los ecosistemas ya que proporcionan un hogar a muchas especies de plantas y animales, ayudan a proteger a las comunidades costeras de tormentas e inundaciones y filtran los contaminantes del agua. Estas zonas se definen como áreas que se cubren de agua, ya sea de forma recurrente o permanente debido a factores tales como su geomorfología, cambios en el nivel del mar a múltiples escalas, condiciones meteorológicas de la región, características del suelo, pendiente, u otras (OEA, 1993). Las zonas inundables se engloban diferentes tipos de terrenos, tales como llanuras de marea, playas, riberas, humedales, etc. Estos últimos son de especial importancia debido a que producen una cantidad importante de bienes y servicios ambientales tales como el control climático, protección ante inundaciones o anegamientos, mantención de la biodiversidad, etc. (Vidal & Romero, 2010).

Cabe mencionar que actualmente se ha producido un aumento en la compresión costera, la cual corresponde a la pérdida de hábitats costeros o el deterioro de su calidad debido a estructuras o acciones antropogénicas, que impiden la transgresión hacia tierra de esos hábitats que, de otro modo, se produciría de forma natural en respuesta a la subida del nivel del mar en conjunción con otros procesos costeros (Smart et al., 2021). La compresión costera puede tener una serie de repercusiones negativas, entre ellas la pérdida de hábitats costeros, como las marismas y los manglares, favoreciendo un aumento de la erosión, ya que hay menos plantas y árboles que ayuden a mantener el suelo en su sitio. (Wu et al., 2022).

Paralelamente a lo anteriormente descrito, otro aspecto que se considerará en este capítulo debido a las características geológicas del área de estudio corresponde a las implicancias sísmicas, las que pueden afectar a las riberas y a las zonas inundables, debido a los cambios en los terrenos que pueden generar los terremotos. Por ejemplo, el evento sísmico de 1960 ocurrido en el área de estudio es mundialmente conocido como el de mayor magnitud registrado hasta la fecha, el cual causó subsidencias de hasta 2 metros, provocando la formación de muchos de los humedales que hoy existen (Reinhardt et al., 2010).

En consecuencia, el presente capítulo tiene como objetivo construir un mapa territorial de los usos de suelo en torno a una ciudad costera, considerando los efectos de la subida del nivel del mar y escenarios de cambios sismológicos.

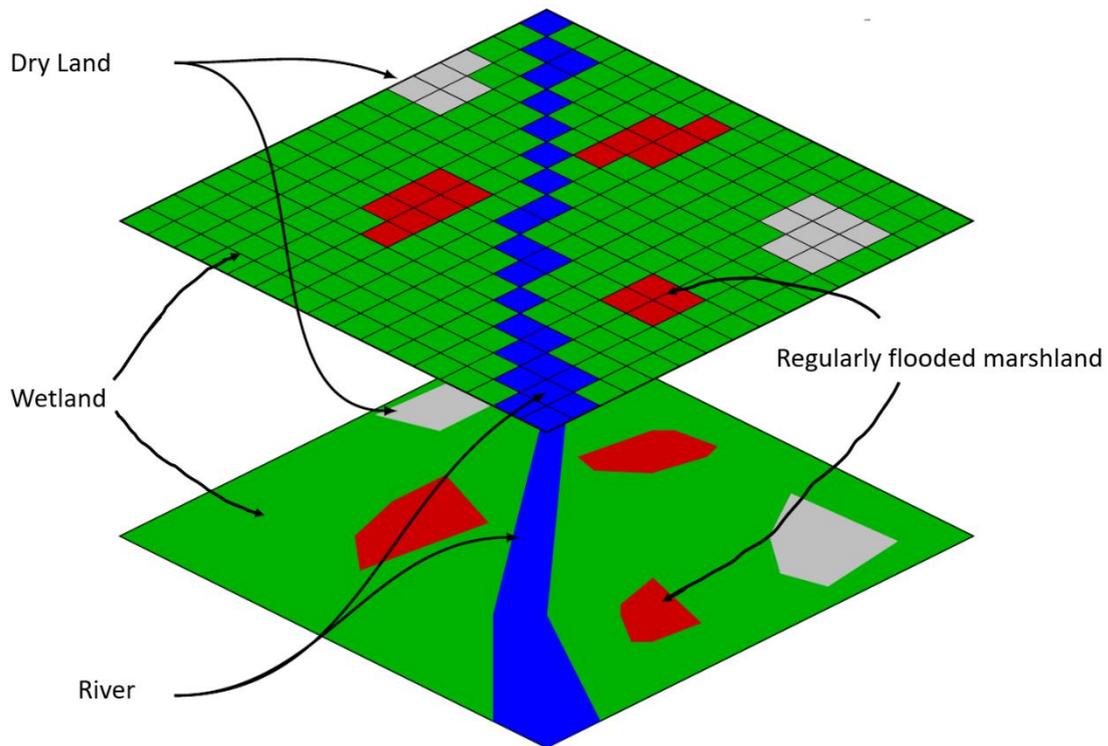
## 5.1 Metodología

### 5.1.1 Contexto urbano del Área de investigación

La Valdivia presenta un retraso en la urbanización en comparación a ciudades de su misma edad (o incluso menores) lo que le otorga la opción de convertirse en una ciudad sustentable, al no haber sufrido de forma intensa las amenazas de la sobreurbanización y destrucción de entornos naturales (Borsddorf et al., 2009). Según Maturana (Maturana et al., 2019) la urbanización que ha experimentado Valdivia ha sido incremental y sostenida, pero no explosiva, y ésta aún no compromete su sustentabilidad. Sin embargo, advierte la tendencia a la edificación cerca de lugares ribereños, indicando que se evidencia que la verticalización de la ciudad está concentrada en estos lugares. Finalmente, Maturana advierte que el desafío es determinar cómo crecer frente a este proceso de verticalización y expansión urbana que ha comenzado, sobre todo considerando que desde 1988 no se ha desarrollado un nuevo plan regulador comunal, sino que solo se le han hecho modificaciones.

### 5.1.2 SLAMM 6.7

Para llevar a cabo este capítulo se hará uso del software SLAMM (The Sea Level Affecting Marshes Model, SLAMM), corresponde a un tipo de modelo matemático denominados "ecosystem-based landscape model" que permite modelar el cambio de cobertura de suelo frente al alza del nivel del mar a largo plazo en humedales y zonas costeras (Fagherazzi et al., 2012). Los datos de entrada principales son archivos ráster que dividen la zona de interés en cuadros (píxeles) de igual tamaño, los cuales albergan información sobre la ocupación del suelo (agua, humedal, tierra seca o desarrollada, etc.), la altura y pendiente, la Figura 5-2 ofrece una representación gráfica de estas características. Todas estas variables están expuestas a un aumento del nivel del mar ante el cual se producen transferencias entre clases de cobertura de suelo según relaciones geométricas y cualitativas (inc. Warren Pinnacle Consulting, 2016b).

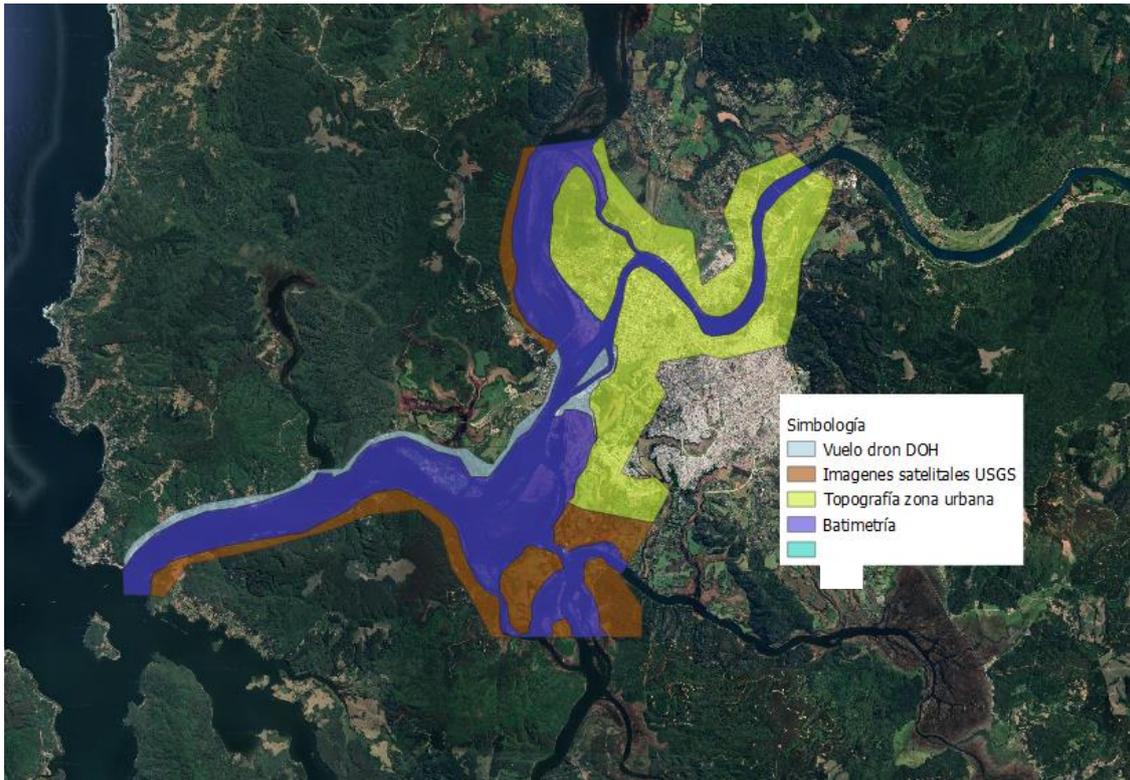


**Figura 5-1: Archivo raster representado en 2D**

### 5.1.3 Obtención de archivos raster

El software SLAMM 6.7 requiere de tres inputs del tipo raster en formato ASC: archivo DEM, archivo de pendientes (slope) y un archivo de usos de suelos.

Se comenzó obteniendo el archivo de elevaciones digitales (DEM, digital elevation model) el cual contiene información altimétrica de la zona de estudio. Se tienen cuatro fuentes de información: Satelital, topografía zona urbana, batimétrica y topografía mediante dron, cuyos aportes se pueden observar gráficamente en la Figura 5-3.



**Figura 5-2: Fuentes para elaboración de archivo DEM.**

La información satelital utilizada para la obtención del relieve de borde del río Tornagaleones, del borde del río Angachilla y del borde sur del estuario del río Valdivia fue extraída del USGS Global Visualization Viewer (Survey, 2022) La topografía de la zona urbana ciudad de Valdivia se obtiene utilizando las curvas de nivel descritas en el archivo topográfico de la ciudad, la cual fue facilitada por la empresa Alerce. La batimetría de la zona de estudio se obtuvo de las cartas náuticas del SHOA (SHOA (Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile), 2015). En cuanto a la topografía de la ribera noroeste del estuario desde el puerto de Niebla hasta el puente Cruces y de la zona Miraflores – Las Mulatas se obtuvo mediante la utilización de un vuelo dron realizado por la Dirección de Obras Hidráulicas (Ministerio de Obras Públicas, 2017).

Toda la información topográfica y batimétrica señalada fue ingresada e integrada en un archivo del software Autodesk Civil 3D en formato de puntos georreferenciados, creándose una superficie la que posteriormente fue exportada en formato DEM quedando disponible para ser trabajada en el software QGIS3.24.0.

Se ingresa en el software QGIS3.24.0 el archivo DEM del área de estudio y se exporta el formato ASC deseado, proceso en el cual se ajusta el tamaño de pixel a 10 metros x 10 metros. El resultado de esta operación se observa en la Figura 5-4.



**Figura 5-3: Mapa de DEM.**

El archivo de pendientes (SLOPE) se obtiene a partir del archivo raster DEM, aplicando el comando “pendiente” dispuesto en QGIS3.24.0. El resultado se observa en la Figura 5-5, el cual consta de un tamaño de pixel de 10x10 metros al igual que el archivo DEM.



**Figura 5-4: Mapa de pendientes (SLOPE).**

Para elaborar el archivo raster “uso de suelos”, es necesario realizar una clasificación de los suelos que actualmente se encuentran en la zona de estudio. Esta clasificación se basa en el documento “Classification of Wetlands and Deepwater Habitats of the United States” (Wetlands Subcommittee, 2013) el cual es utilizado en el software SLAMM 6.7 para catalogar los tipos de cobertura de suelo. Entre las categorías de suelo que permite ingresar el software se encuentran: marismas, masas de agua, playas, terreno seco el cual se divide entre desarrollado y no desarrollado, entre otros.

La estructura de clasificación de humedales mencionada anteriormente consta de 4 niveles, los cuales son: Sistema, Sub-sistema, Clase, Subclase. De esta forma, para la zona de estudio se seleccionan los parámetros indicados en la Tabla 5-1:

**Tabla 5-1: Clasificación de humedales de la zona de estudio**

Nivel	Clasificación	Definición
<b>Sistema</b>	Estuarino (E)*	Considera hábitats de mareas de aguas profundas y humedales. El agua del océano se diluye al menos ocasionalmente por la escorrentía de agua dulce.
<b>Subsistema</b>	Intermareal (2)	Que se ve influenciado por las mareas.
<b>Clase</b>	Emergente (EM)	Se caracteriza por plantas emergentes, tales como, hidrófitas herbáceas erectas con raíces, se excluyen musgos y líquenes. Suelen estar dominados por plantas perennes, en el caso del área de estudio la Schoenoplectus californicus.
	Lecho acuático (AB)	Se caracteriza por plantas que crecen sobre o debajo de la superficie, del tipo vascular, con raíces sumergidas o flotantes, musgos sumergidos y algas. En resumen, Las plantas están adheridas al sustrato o flotando.
<b>Subclase</b>	1 (EM)	Corresponde a la clasificación de Persistentes, las cuales son aquellos hidrofitos cuyos tallos y hojas son evidentes todo el año sobre la superficie del agua.
	1 3 4 (AB)	Comprende musgos, algas, vasculares flotantes y vasculares enraizadas.

\* Las siglas entre paréntesis corresponden a las abreviaciones de las clasificaciones existentes en "Classification of Wetlands and Deepwater Habitats of the United States"

Para la identificación de la cobertura de suelo del área de estudio se realizó una inspección satelital utilizando el Mapa Aéreo de Bing cargado en Autodesk Civil 3D. Así, con base en la estructura de clasificación de humedales mencionada anteriormente y la inspección satelital, se determinan las coberturas de suelo en el área de estudio, para posteriormente seleccionar las categorías correspondientes señaladas en el documento técnico de SLAMM 6.7 (inc. Warren Pinnacle Consulting, 2016b). En la Tabla 5-2 se exponen las categorías de humedales seleccionadas y su correspondiente código según el mencionado documento técnico.

**Tabla 5-2: Clasificación de marismas, extracto del documento técnico de SLAMM6.7.**

NWI code Characters						
System	Subsystem	Class	Subclass	Name		SLAMM Code
E	2	EM	1, none	Regularly	Flooded	Marsh 8
				(Saltmarsh)		
E	2	AB	all	Tidal Flat		11

E	2	EM	1	Irre. Flood. Marsh	20
---	---	----	---	--------------------	----

De esta forma, según las categorías indicadas en el manual técnico de SLAMM 6.7 se considera que las zonas de estudio contienen las categorías: Terreno seco desarrollado, terreno seco no desarrollado, agua abierta estuarina, caño mareal, pantano inundado irregularmente, pantano inundado regularmente (marisma salada) y océano abierto.

Una vez identificado el uso de suelo se dibujan polígonos en Civil 3D los cuales son exportados al software QGIS3.24.0 en formato de capa vectorial, se les asigna a las diferentes áreas un atributo correspondiente a un número (1, 2, 17, 18, 20, 8 y 19 respectivamente), el que corresponde al código numérico con el cual trabaja SLAMM 6.7 para determinar el uso de suelo de un área. Luego, se convierte el archivo vectorial a raster, ajustando su tamaño haciendo uso de la herramienta recorte, calzando las dimensiones con el archivo DEM.

Finalmente, el procesamiento termina con el ajuste del archivo a una dimensión de pixel de 10 m x10 m, observable en la Figura 5-6.

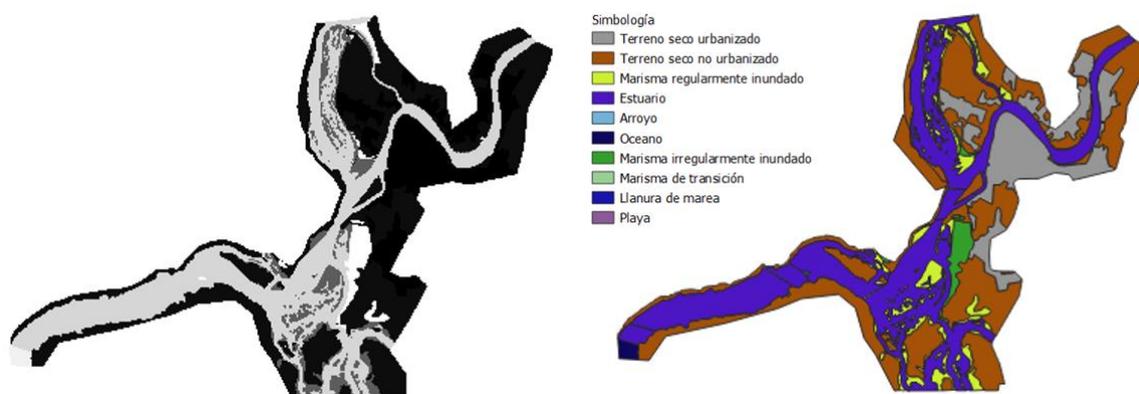


Figura 5-5: A la izquierda mapa raster de uso de suelo en escala de grises, a la derecha el mapa raster en formato polígono con la identificación de cada área.

#### 5.1.4 Parámetros del modelo

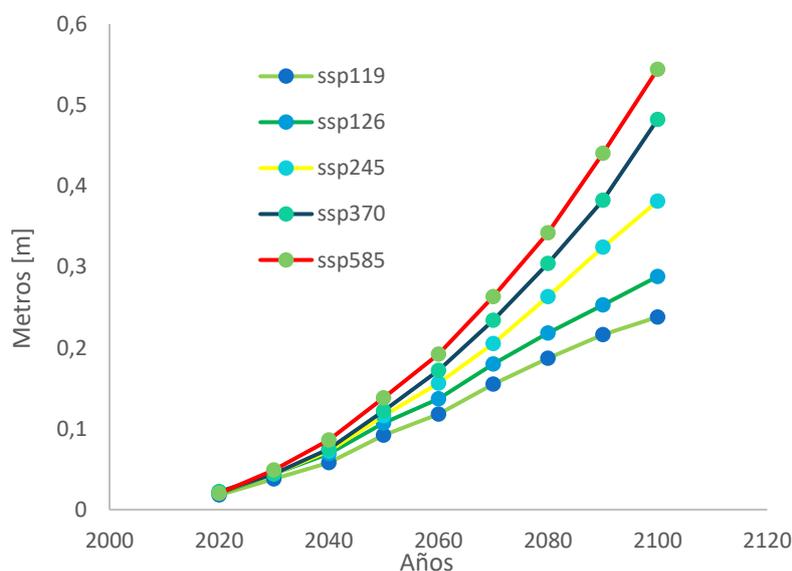
Se ingresan a SLAMM6.7 los atributos del área de estudio, estos corresponden a los señalados en la Tabla 5-3:

Tabla 5-3: Atributos del área de estudio ingresados al software.

<b>Atributo</b>	
Año de las imágenes satelitales	2022
Año de los datos topográficos	2017
Ubicación del océano (en modelo)	Oeste
Rango intermareal [m]	1.16
Acreción [mm]	14.7
Erosión [mm]	-

Es importante mencionar que la erosión, al igual que en el capítulo anterior, no se considera, que para estos análisis, sus cambios son marginales, como indica (D’Alpaos et al., 2011), quienes señalan, la erosión en ríos es mínima.

En cuanto al rango intermareal es obtenido del estudio sobre el comportamiento del humedal río Cruces frente a cambios relativos del nivel del mar (Capítulo 4). Para la acreción se hace uso del estudio realizado por Reinhardt (Reinhardt et al., 2010) del cual se extrae el valor promedio. Para estimar el incremento del nivel del mar producido en el periodo de análisis se utilizan los datos proporcionados por el “Sea Level Projection Tool” (NASA, 2021), el cual se basa en los escenarios SSP (Shared Socioeconomic Pathways) utilizados para la realización del sexto informe de la IPCC (NASA, 2021) Estos son llamados escenarios básicos descritos en la Tabla 4-1, mientras que en la Figura 5-7 se representa gráficamente las proyecciones de aumento del nivel del mar para los diferentes escenarios al año 2100 sin considerar los sismos en la zona de estudio.

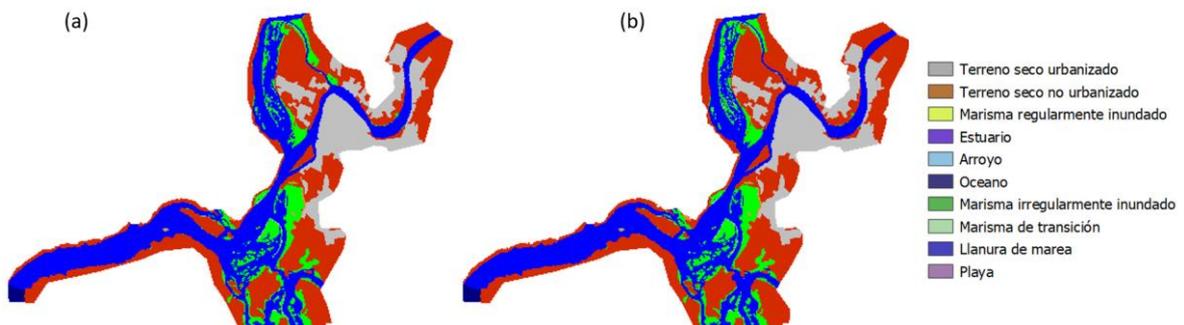


**Figura 5-6: Escenarios de aumento del nivel del mar.**

En cuanto a los pasos temporales a realizar la simulación comienza en la fecha de cobertura inicial (2017), luego se simula hasta el año 2100 con pasos temporales de solución del modelo en 2030, 2050 y 2100.

*5.1.5 Calibración y validación*

Para poder comenzar la simulación es necesario calibrar el modelo, esto se lleva a cabo considerando el año 0, el cual corresponde al año de la información de la distribución y caracterización de los humedales es decir el año 2022. El criterio de calibración consiste en que el 90% de las áreas que exhibe el software debe ser concordante con lo que ocurre en el presente, considerando que algunas zonas puedan estar debajo de su categoría de cobertura. Todo esto con base en lo descrito por Warren Pinnacle, creadores del software en el informe “Advancing Existing Assessment of Connecticut Marshes’ Response to SLR” (inc. Warren Pinnacle Consulting, 2016a) En el caso de la modelación realizada, un 94% de las áreas se mantienen en su categoría, por lo que se acepta la calibración. La comparación grafica puede observarse en la Figura 5-8.



**Figura 5-7: Calibración del modelo. (a) Condición inicial y (b) Año “0”.**

Se observa que, en su mayoría, las áreas permanecen en su categoría, las zonas que presentan desviaciones son aquellas correspondientes a marismas, las cuales cambian de regular a irregular, pero al ser una baja proporción, se acepta la calibración.

En cuanto al proceso de validación del modelo que se realiza una simulación retrospectiva de 2005 a 2018 para la validación, utilizando la información del aumento

del nivel de la mar recolectada por el mareógrafo ubicado en bahía Corral. Para la obtención de los correspondientes archivos raster se siguió el proceso anterior añadiendo la utilización de Google Earth y su herramienta historial de imágenes para realizar la categorización de cobertura de suelo para el año 2005. Realizada la simulación se observa que las riberas permanecen coherentes con la situación observada en el año 2022 a excepción del humedal en el río Cruces, el cual presenta cambios notables en el año 2010 coincidiendo con el evento sísmico conocido como 27F, situación que se describirá en la discusión más adelante. Así, se acepta el modelo, al predecir el comportamiento en las riberas del área de estudio, tal como se evidencia en la Figura 5-9.

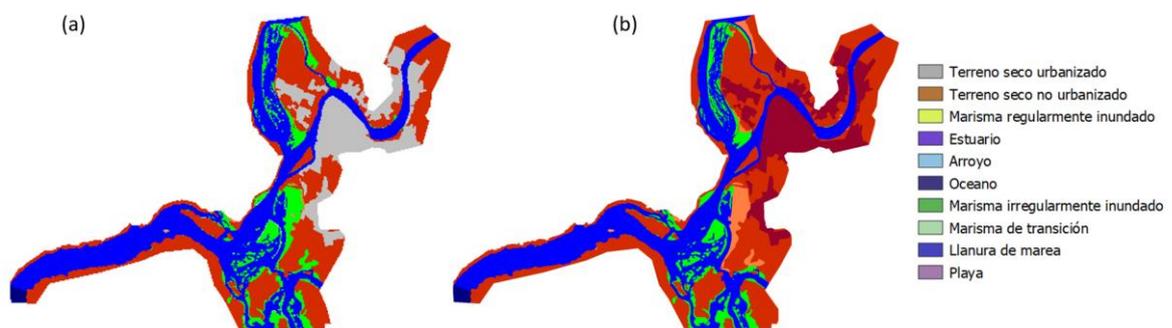


Figura 5-8: Comparación entre (a) simulación de validación y (b) cobertura de suelo año 2022.

## 5.2 Resultados y discusión

### 5.2.1 Zona de estudio general

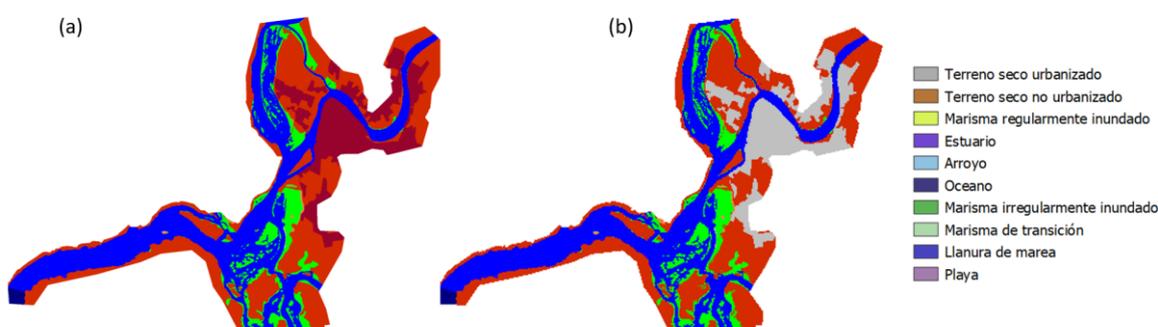
Se han obtenido mapas de predicción de cambio de uso de suelos para cada uno de los escenarios en los años señalados previamente. La Tabla 5-4 da cuenta del cambio de área de las diferentes categorías de suelo utilizadas con respecto a las áreas iniciales para el año 2030. Se observa que los cambios de área para los diferentes escenarios presentan pequeñas variaciones, que son prácticamente despreciables. Es por esto por en la Figura 5-10 se exhiben los resultados gráficos para un solo escenario, siendo este el escenario SSP2-4.5 (Tabla 4-1).

En cuanto a la variación de área en los usos de suelo, las principales fluctuaciones se observan en las marismas irregularmente inundadas y los secundan las marismas regularmente inundadas. En la Figura 5-12 se puede ver la relación entre los cambios de área de las marismas irregularmente inundadas y las marismas regularmente

inundadas, donde las primeras son en su mayoría transformadas en las segundas. En general, la variación en los demás usos es mínima no superando el 3%.

**Tabla 5-4: Proyecciones a año 2030 de usos del suelo.**

Parametros	Codigo SLAMM	Area inicial	Areas [Ha]					Cambio de area [%]				
			1,19	1,26	2,45	3,7	8,85	1,19	1,26	2,45	3,7	8,85
T. seco urbanizado	1	994,49	994,20	994,20	994,20	994,20	994,20	-0,03%	-0,03%	-0,03%	-0,03%	-0,03%
T. seco no urbanizado	2	2427,37	2366,26	2366,26	2366,26	2366,26	2366,26	-2,52%	-2,52%	-2,52%	-2,52%	-2,52%
Marisma de transición	7	0,00	43,03	43,03	43,03	43,03	43,03					
Marisma reg. Inund.	8	506,55	646,95	646,95	646,95	646,95	646,95	27,72%	27,72%	27,72%	27,72%	27,72%
Llanura de marea	11	0,00	4,35	4,35	4,35	4,35	4,35					
Estuario	17	2246,66	2284,21	2284,21	2284,21	2284,21	2284,21	1,67%	1,67%	1,67%	1,67%	1,67%
Arroyo	18	3,03	3,03	3,03	3,03	3,03	3,03	0,06%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Oceano	19	33,92	33,86	33,86	33,86	33,86	33,86	-0,18%	-0,18%	-0,18%	-0,18%	-0,18%
Marisma irreg. Inund.	20	185,49	17,26	17,26	17,26	17,26	17,21	-90,69%	-90,69%	-90,69%	-90,69%	-90,72%



**Figura 5-9: Comparación entre (a) cobertura de suelo año 2022 y (b) Mapa de predicción de cambio de uso de suelos para el año 2030 para el escenario SPP2.45.**

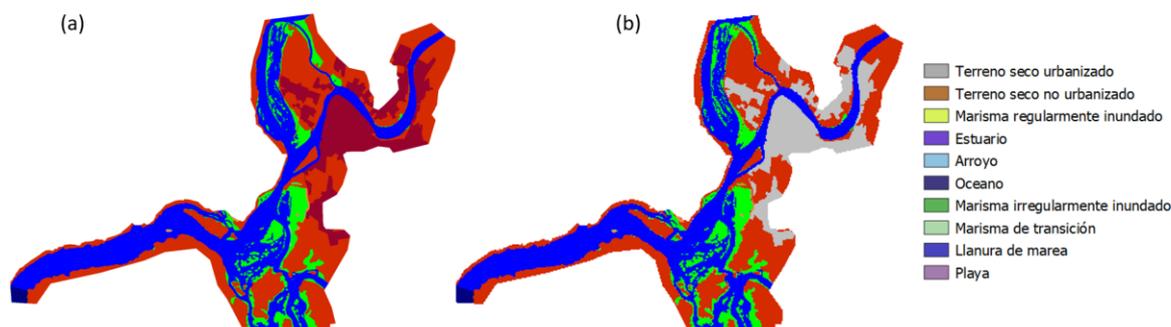
El cambio de área de las diferentes categorías de suelo para el año 2050 se presenta en la Tabla 5-5. La mayoría de los usos de suelos presentan leves cambios respecto al año 2030 a excepción de Arroyo y Océano los cuales continúan sin presentar variación. La diferencia entre los resultados para cada escenario es prácticamente inexistente, esto debido a que el delta de tiempo no es significativo para la proyección de la subida del nivel medio del mar.

El uso de suelo que presenta el cambio más relevante corresponde a la marisma regularmente inundada que continúa incrementando su área. Los demás parámetros que varían lo hacen de forma mínima no superando el 3%.

La Figura 5-11 contiene el mapa de predicción de cambio de uso de suelos para el año 2050, el que debido a la mínima variación de los resultados entre los diferentes escenarios se continúa utilizando solo escenario el SSP2-4.5 al igual que para el año 2030.

**Tabla 5-5: Resultados proyecciones año 2050**

Parametros	Codigo SLAMM	Area inicial	Areas [Ha]					Cambio de area [%]				
			1.19	1.26	2.45	3.7	8.85	1.19	1.26	2.45	3.7	8.85
T. seco urbanizado	1	994.49	994.20	994.20	994.20	994.20	994.20	-0.03%	-0.03%	-0.03%	-0.03%	-0.03%
T. seco no urbanizado	2	2427.37	2366.26	2366.26	2366.26	2366.26	2366.26	-2.52%	-2.52%	-2.52%	-2.52%	-2.52%
Marisma de transición	7	0.00	43.03	43.03	43.03	43.03	43.03					
Marisma reg. Inund.	8	506.55	646.95	646.95	646.95	646.95	646.95	27.72%	27.72%	27.72%	27.72%	27.72%
Llanura de marea	11	0.00	4.35	4.35	4.35	4.35	4.35					
Estuario	17	2246.66	2284.21	2284.21	2284.21	2284.21	2284.21	1.67%	1.67%	1.67%	1.67%	1.67%
Arroyo	18	3.03	3.03	3.03	3.03	3.03	3.03	0.06%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Oceano	19	33.92	33.86	33.86	33.86	33.86	33.86	-0.18%	-0.18%	-0.18%	-0.18%	-0.18%
Marisma irreg. Inund.	20	185.49	17.26	17.26	17.26	17.26	17.21	-90.69%	-90.69%	-90.69%	-90.69%	-90.72%

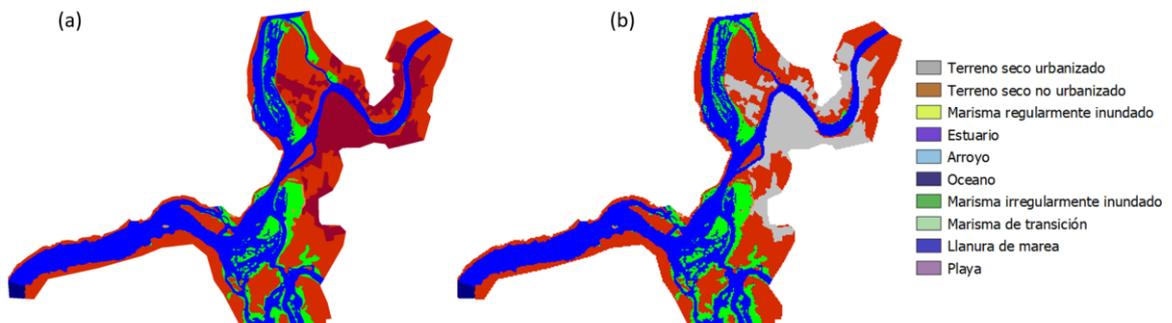


**Figura 5-10: Comparación entre (a) cobertura de suelo año 2022 y (b) Mapa de predicción de cambio de uso de suelos para el año 2050 para el escenario SPP2.45.**

En cuanto al año 2100 la Tabla 5-6 da cuenta del respectivo cambio de área de las diferentes categorías de suelo con respecto a las áreas iniciales. Las variaciones entre escenarios una vez más es mínima, siendo el uso de suelo marisma regularmente inundada el que presenta la mayor variación correspondiente a un 1,21% entre los escenarios SSP3-7.0 y SSP5-8.5, las demás categorías que presentan variaciones entre escenarios no superan el 1%. En general, no existen cambios sustanciales respecto al año 2050. En la Figura 5-12 se presenta el mapa de predicción de cambio de uso de suelos para el año 2100 utilizando el año SSP2-4.5 tal como en los años anteriores.

**Tabla 5-6: Resultados de las proyecciones a año 2100.**

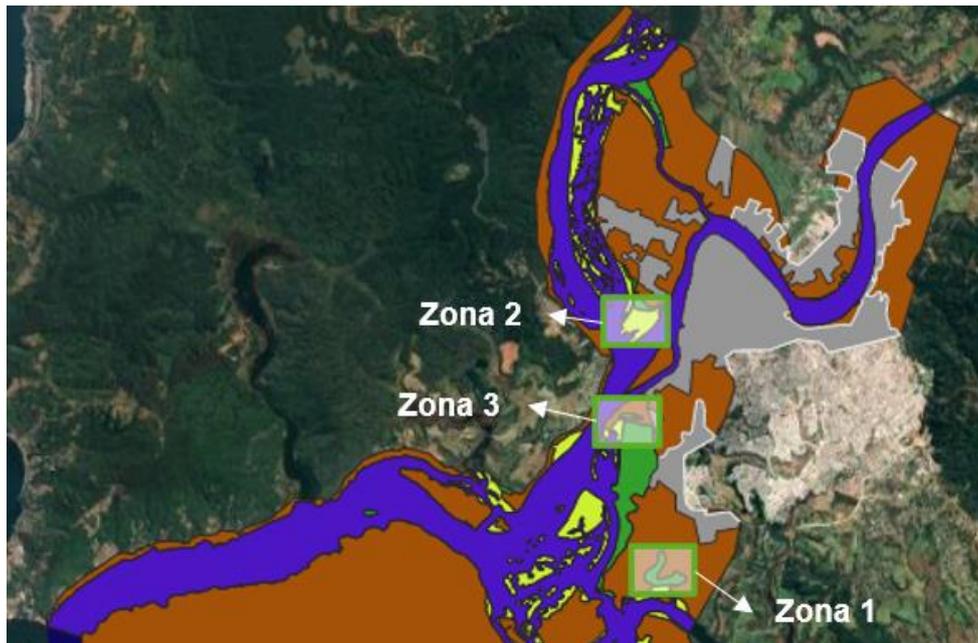
Parametros	Codigo SLAMM	Area inicial	Areas [Ha]					Cambio de area [%]				
			1.19	1.26	2.45	3.7	8.85	1.19	1.26	2.45	3.7	8.85
T. seco urbanizado	1	994.49	993.63	993.57	993.29	993.29	993.29	-0.09%	-0.09%	-0.12%	-0.12%	-0.12%
T. seco no urbanizado	2	2427.37	2326.19	2325.31	2321.25	2321.25	2321.25	-4.17%	-4.20%	-4.37%	-4.37%	-4.37%
Marisma de transición	7	0.00	22.19	3.63	12.90	3.39	9.35					
Marisma reg. Inund.	8	506.55	695.62	698.10	696.18	701.03	694.90	37.33%	37.82%	37.44%	38.39%	37.18%
Llanura de marea	11	0.00	8.27	23.79	17.71	15.44	9.53					
Estuario	17	2246.66	2292.80	2294.21	2297.65	2304.58	2310.66	2.05%	2.12%	2.27%	2.58%	2.85%
Arroyo	18	3.03	3.03	3.03	3.03	3.03	3.03	0.00%	0.00%	0.06%	0.00%	0.00%
Oceano	19	33.92	33.86	33.86	33.86	33.86	33.86	-0.18%	-0.18%	-0.18%	-0.18%	-0.18%
Marisma irreg. Inund.	20	185.49	17.55	17.64	17.27	17.27	17.27	-90.54%	-90.49%	-90.69%	-90.69%	-90.69%



**Figura 5-11: Comparación entre (a) cobertura de suelo año 2022 y (b) Mapa de predicción de cambio de uso de suelos para el año 2100 para el escenario SPP2-4.5.**

### 5.2.2 Zonas particulares de interés

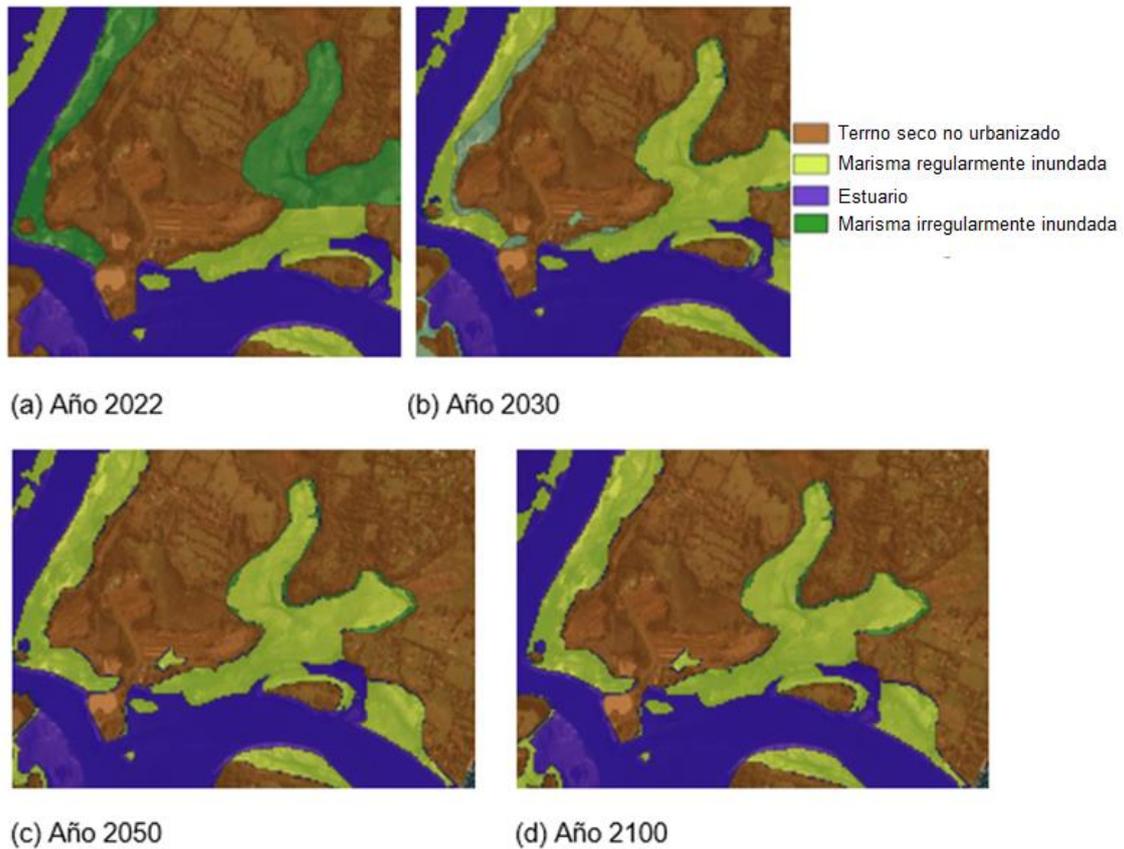
A continuación, se analizan tres zonas de interés y su evolución en el tiempo las que se encuentran señaladas en la Figura 5-13. Estas zonas presentan especial interés debido a que son amplias zonas de marismas cercanas a la urbe. En el caso de la zona 1, corresponde al sector Angachilla, el cual ha presentado un aumento en su urbanización de tipo residencial. La zona 2 corresponde al sector Teja Sur, el que ya se encuentra consolidado en urbanización y también es de tipo residencial. Finalmente, la zona 3 corresponde al sector Las Mulatas, el cual presenta en sus alrededores zonas urbanas residenciales y dos importantes vías de conexión, las cuales son el camino que conecta Las Mulatas con el sector llamado Guacamayo (hacia el sur) y el camino que lleva a la barcaza de Las Mulatas (hacia el oeste), la cual permite conectar dicho sector con el camino a la Niebla, ruta muy usada en épocas estivales.



**Figura 5-12: Zonas de interés a analizar, zona 1: Borde sur sector Angachilla, zona 2: Teja Sur y zona 3: sector Las Mulatas.**

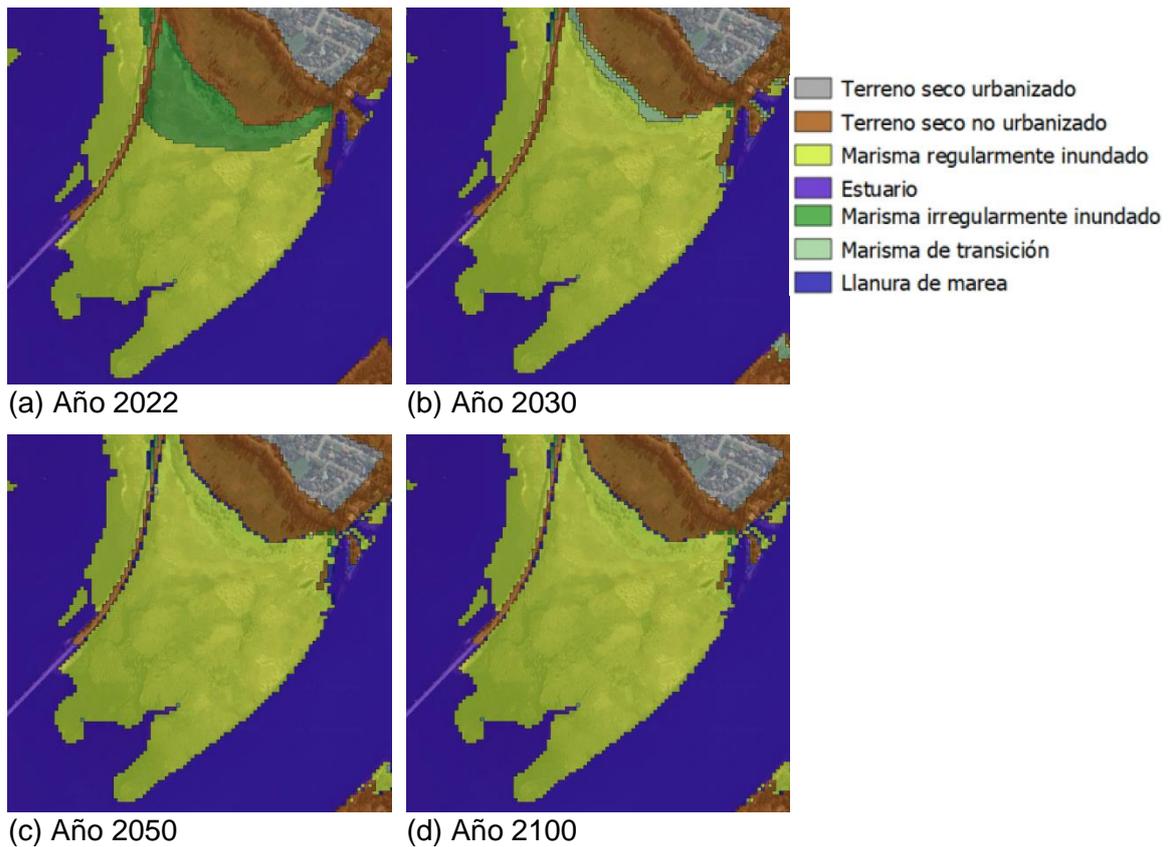
En general, las variaciones en las dimensiones de las áreas para los distintos usos de suelo, son mínimas y se desarrollan de manera paulatina, a excepción de las marismas irregularmente inundadas (áreas color verde) y las marismas regularmente inundadas (áreas color amarillo). Las primeras presentan un deceso casi total al año 2030 transformándose en su mayoría en marismas regularmente inundadas, quienes presentan un ascenso al 2100 de 74%. En la Figura 5-14 se expone el caso de la zona 1, en la cual se observa como una marisma cambia de irregularmente inundada a regularmente inundada y como a la vez se expande a terreno seco. Durante el periodo de 2022-2030 se producen los mayores cambios de área en la marisma del lugar, pudiendo observarse como el área color verde correspondiente a las marismas irregularmente inundadas cambian al color amarillo que corresponde a las marismas regularmente inundada, luego la variaciones son menores, pero sostenidas, las marismas irregularmente inundadas mantienen sus dimensiones para los años 2050 y 2100, mientras que las regularmente inundadas aumentan 8% entre los años 2030-2050 y mantienen sus dimensiones para el periodo 2050-2100, lo que es esperable debido a que los bordes de las marismas crecen hacia tierras previamente secas, primero siendo marismas irregularmente inundadas y luego algunas llegan a ser regularmente inundadas. Se estima que este descenso en la velocidad de expansión se relaciona con que SLAMM 6.7 simula el proceso de expansión de una marisma con base en el nivel del agua (rango de marea y aumento del nivel del mar) y la pendiente

del sector. Es por lo que en áreas donde se presenta un mayor aumento de pendiente la expansión es más lenta.



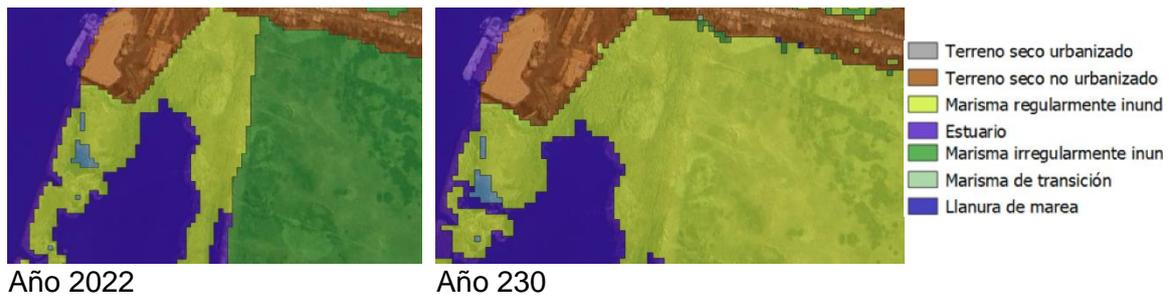
**Figura 5-13: Cambio de cobertura de suelo zona 1 (Borde sur sector Angachilla en confluencia del río Valdivia con río Tornagaleones) para el escenario SSP2-4.5.**

En la zona 2 presentada en la Figura 5-15 puede observarse como la marisma que era catalogada como irregularmente inundada cambia a regularmente inundada prácticamente en su totalidad (99%) para el periodo 2022-2030. En específico, en el año 2030 se puede ver como terreno que antes no era una marisma se transforma primeramente en irregularmente inundada y luego en los siguientes años se transforma en marisma regularmente inundado, incrementando 24% en el periodo 2022-2030, 4% para el periodo 2030-2050 y manteniendo sus dimensiones para el periodo 2050-2100, reflejando que es SLAMM 6.7 simula manera óptima la forma en que se coloniza nuevos espacios.



**Figura 5-14: Cambio de cobertura de suelo zona 2 (sector Teja Sur) para el escenario SSP2-4.5**

El sector Las Mulatas (correspondiente a la zona 3) es de particular interés debido a que se encuentra un campamento (viviendas irregulares), el cual está alojado en los bordes del camino al balceo Las Mulatas. Estos hogares se encuentran edificados a diversas alturas sobre el humedal, siendo algunos limítrofes a este, significando una zona de riesgo de inundación. En la Figura 5-16 se expone el cambio de cobertura de suelo en el tiempo para el año 2030 considerando el escenario SSP2-4.5. Se observa un cambio de una marisma irregularmente inundada a regularmente inundada prácticamente en su totalidad (99%), también se identifica una disminución en el humedal que en sus inicios era regularmente inundado transformándose en agua estuarina, también se observa la aparición de marismas de transición. Esta expansión del humedal puede significar una amenaza para los residentes de aquel campamento, pudiendo afectar las estructuras de las viviendas construidas y la salud de las personas.



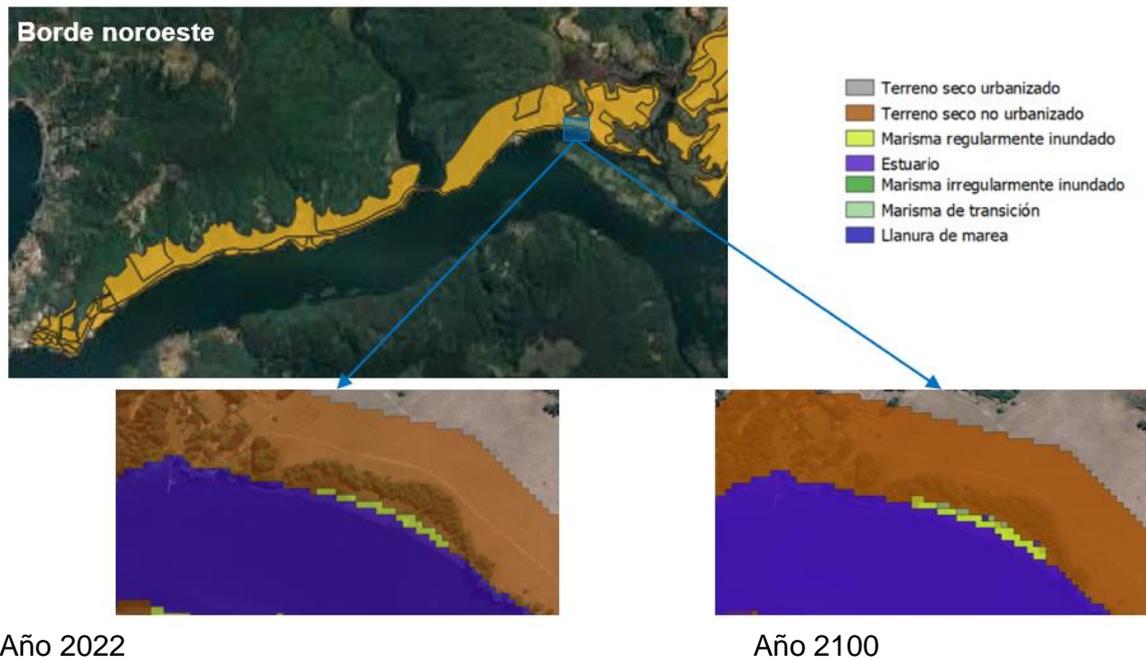
**Figura 5-15: Cambio de cobertura de suelo en el tiempo para el año 2030 considerando el escenario SSP2-4.5.**

En cuanto a las implicancias de las zonas inundables sobre el actual Plan Regulador Comunal de Valdivia, se consideró para el análisis el escenario SSP2-4.5, debido a que tal como se mencionó anteriormente, no existen diferencias significativas entre los escenarios, ofreciendo así, una estimación de donde nos encontraríamos siguiendo nuestro actual comportamiento como sociedad. La Figura 5-17 presenta la extensión del actual Plan Regulador de Valdivia en el área de estudio.



**Figura 5-16: Plan Regulador Comunal de Valdivia en el área de estudio. Fuente: Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU, 2021)**

En el borde comprendido desde la Avenida Siete al sector de Niebla (ribera noroeste del río Valdivia), no se observan cambios relevantes en las zonas inundables para el año 2030 ni para el año 2050, mientras que para el año 2100 existen cambios ejemplificados en la Figura 5-18. Sin embargo, estas variaciones son minúsculas, el cambio de área del terreno seco del borde costero perteneciente al Plan Regulador es de un 0,31%, lo que se considera que el aumento del nivel del mar no afecta a esta zona del área de estudio. Esto puede entenderse al observar que la topografía del sector presenta pendientes bastante altas, no existiendo así margen para el cambio de la cobertura de suelo.



**Figura 5-17: Ejemplo cambios ribera sector camino a Niebla (borde noroeste del río Valdivia).**

Para el borde oeste si se observan cambios, los que son exhibidos en la Figura 5-19. Para el año 2030 podemos ver pequeños cambios en la ribera, apareciendo marismas de transición, marismas de inundación regular y un crecimiento menor del estuario. Para el año 2100 el cambio más notable es el crecimiento área ocupada por el estuario, el que incluso en algunas zonas desplaza aquellas zonas en las que se habían formado marismas. Es de especial atención las zonas ZR-3, ZE-2 y ZE-2a ubicadas entre avenida Siete y el sector Torobayo. El actual plan regulador considera esta zona de la ribera en casi toda su extensión con la categoría ZR-3, la cual asigna esta área como una zona inundable. Este aumento de área del estuario estaría en concordancia con lo previsto por el plan regulador.

En cuanto a las zonas ZE-2 y ZE-2a presentan un par de ingresos puntuales de marismas en el año 2030 y del estuario en el año 2100 que requieren atención, debido a que estas zonas están catalogadas para establecimiento de viviendas.



Figura 5-18: Ribera oeste comprendida entre avenida Siete y Torobayo (borde oeste).

En general, el resto de las zonas del Plan Regulator no se ven afectadas por las proyecciones de aumento del nivel del mar.

Con base a lo anterior (Figura 5-19), no se sugieren cambios en el actual Plan Regulator, dado que las zonas inundables concuerdan con la categorización realizada por el Plan Regulator, tales como “zonas de protección de Cauces y Laderas, ríos, canales y quebradas” o “Zonas de Riesgos de inundación” (MINVU, 2021).

En virtud de lo observado, se puede establecer que, bajo los parámetros considerados, las proyecciones no presentan cambios a los usos de suelo del actual plan regulador de Valdivia, de esta forma, no se elabora un nuevo mapa territorial.

### *5.2.3 Comportamiento frente a un evento sísmico*

Finalmente, se analiza el comportamiento de la zona de estudio frente a un evento sísmico. Tal como se mencionó en la validación del modelo, SLAMM6.7 presenta limitaciones al predecir cambios repentinos dentro del cuerpo de agua, ya que este modelo está concebido para analizar la "long-term mean sea level rise", y no cambios bruscos y puntuales como los que se producen en un terremoto. Sin embargo, como ha quedado evidenciado es útil para analizar las riberas, es por esto que se selecciona el área correspondiente a Las Mulatas y sus alrededores para evaluar las consecuencias de la ocurrencia de dos sismos: uno de magnitud 8,8 Mw (Atenuado en la ciudad de Valdivia a 6,9 Mw) ocurrido el 27 de febrero del año 2010 con epicentro cerca de la ciudad de Concepción (Chile), y otro de magnitud 9,5 Mw ocurrido en 1960 con epicentro en la propia ciudad de Valdivia (Chile). Cabe señalar que ambos sismos son de los más importantes ocurridos en Chile, siendo el primero de tal importancia que introdujo diversas modificaciones en las normativas que rigen el diseño de elementos civiles, mientras que el segundo es el mayor sismo registrado hasta la fecha por la humanidad. Se selecciona el año 2060 como año de ocurrencia del evento y se comparan los resultados de la proyección al 2100 entre la simulación sin terremoto y las simulaciones con los terremotos anteriormente descritos. La elección del año 2060 según la información estadística obtenida en Capítulo 4.

Se ha registrado que los sismos generan subsidencias en los terrenos cercanos al río, lo cual es esperable debido a la composición del suelo presente en el área de estudio. Esto puede observarse en la Figura 5-20, que muestra la microzonificación sísmica realizada por Alvarado (2018) y que agrupa los suelos según su comportamiento frente a un sismo.



Figura 5-19: Extracto microzonificación sísmica. Fuente: (Alvarado, 2018).

Con base a lo anterior, se realizó un análisis considerando una subsidencia presentadas en el capítulo anterior, de 0,8 m para el sismo de magnitud 6,9 Mw y de 1,8 m para el sismo de magnitud 9,5 Mw. Los resultados se exponen a continuación en la Figura 5-21.

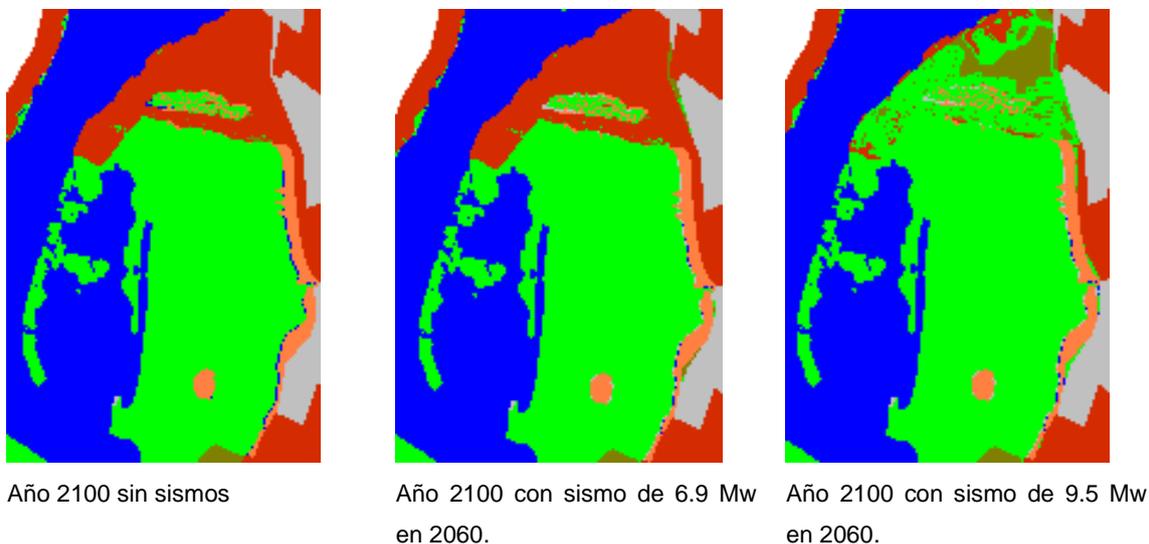


Figura 5-20: Comparación entre simulaciones al año 2100 entre caso sin sismo y casos con sismo de 6,9 Mw y 9,5 Mw

Se puede apreciar en la Figura 5-21 que un descenso de 0,8 m provocado por un sismo de 6,9 Mw no genera cambios significativos en la zona estudiada, en general los bordes del humedal permanecen iguales a la situación sin sismo. Por otro lado, la ocurrencia de un sismo de 9,5 Mw y el correspondiente descenso de 1,8 m de la zona

estudiada genera cambios apreciables en la figura anterior, principalmente, se observa como el humedal crece hacia el norte, a zonas previamente categorizadas como suelo seco no urbanizado.

Los resultados obtenidos son coherentes con lo documentado en la bibliografía referente al proceso de formación de los humedales de la zona, en específico, se registra que el evento sísmico de 1960 ocurrido en el área de causó hundimientos entre 1 a 2 metros de la ribera en diferentes zonas, provocando la formación de muchos de los humedales que hoy existen (Reinhardt et al., 2010), lo cual evidencia la simulación.

En la zona seleccionada existe una Barcaza que conecta el sector Las Mulatas con el sector Torobayo (camino a la costa). El camino para llegar a tal lugar se encuentra entre dos zonas de humedales tal como se aprecia en las figuras anteriores. En la simulación, para un sismo de 9,5 Mw, el camino que conecta la barcaza con la urbe se convierte en humedal, por lo que de ocurrir un sismo como el simulado, generaría problemas de conexión en el lugar, inhabilitando la funcionabilidad de mencionado recinto.

#### *5.2.4 Medidas de mitigación a efectos de inundación*

Las medidas a considerar para estas zonas pueden estar basadas en enfoques blandos, duros o híbridos (Lai et al., 2015). El uso de uno u otro de estos enfoques dependerá de los objetivos propuestos para el área en cuestión. Los enfoques blandos consisten en la restauración y rehabilitación de las zonas favoreciendo o restituyendo elementos naturales como dunas o marismas, también pueden adaptarse medidas de protección de ciertas zonas de interés (Chapman & Underwood, 2011). Los enfoques duros implican la utilización de materiales duros (hormigón, rocas, etc.) para evitar inundaciones, erosión, etc. La combinación de ambos enfoques se conoce como enfoque híbrido.

Considerando que ambas áreas que sufren el ingreso del río al año 2100 se plantean las siguientes medidas duras y blandas:

Estrategias Duras:

- Se sugiere la implementación de espigones en las zonas aledañas a los muelles, los cuales proveerían de protección a la ribera modificando el flujo pudiendo adaptar el muelle a este nuevo escenario.

- Se sugiere la utilización de diques de contención que protejan las zonas frente al aumento del nivel del río. Al implementar los diques los muelles se verían modificados, posiblemente siendo incorporados a la estructura de los diques, requiriendo elevar la zona mediante rellenos.

Estrategias Blandas:

- Mantener la urbanización sin cambios, y regular los códigos de construcción de la ordenanza local de edificación, con el objetivo de prohibir o adaptar las construcciones en estas zonas de ribera, con sistema de casas anfibas o de pilotes.

Se sugiere la adaptación de los muelles existentes transformándolos en muelles flotantes, preservando así su servicio. Esto implicaría modificar las categorías de aquellas zonas en el Plan Regulador, para considerarlas zonas inundables.

Este capítulo investiga el impacto de la subida del nivel del mar en el cambio de los humedales del estuario del río Valdivia y su influencia sobre las zonas urbanas de la ciudad. El estudio utiliza el software SLAMM 6.7 para modelar los cambios de la cubierta terrestre debido al aumento a largo plazo del nivel del mar sobre humedales y zonas costeras. El estudio indica que las principales fluctuaciones en el uso del suelo se observan en las marismas de inundación irregular y en las marismas de inundación regular, siendo estas últimas las que muestran un mayor aumento de superficie. En general, las variaciones en las dimensiones de las zonas para los distintos usos del suelo son mínimas y se desarrollan gradualmente. Se analizan tres zonas de interés y se observa que las marismas de inundación irregular cambian a marismas de inundación regular, aumentando su superficie. Además, se muestra que el cambio en la velocidad de expansión de la marisma está relacionado con el hecho de que SLAMM 6.7 simula el proceso de expansión de la marisma en función del nivel de agua y de la pendiente del sector.

## **Capítulo 6. Tendencias en la construcción de viviendas resistentes a las inundaciones: casas anfibias y casas sobre pilotes**

La vulnerabilidad climática es la predisposición por verse afectado negativamente por el cambio climático. Puede aplicarse tanto a los sistemas naturales, como a los seres humanos (IPCC, 2021). La vulnerabilidad al cambio climático engloba "diversos conceptos y elementos, como la sensibilidad o susceptibilidad al daño y la falta de capacidad para afrontarlo y adaptarse", tales como: (a) Exposición: El grado en que un sistema está expuesto al cambio climático, como la frecuencia e intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos. (b) Sensibilidad: El grado en que un sistema se ve afectado por el cambio climático, como la capacidad de un cultivo para soportar el estrés térmico. (c) Capacidad de adaptación: La capacidad de un sistema de adaptarse al cambio climático, como la capacidad de una comunidad de construir diques para protegerse de la subida del nivel del mar. (Thornes, 2002). Además, la vulnerabilidad depende de diversos factores, como la ubicación, algunas regiones son más vulnerables al cambio climático que otras, como las situadas en zonas bajas o las que dependen en gran medida de la agricultura. El nivel socioeconómico, las personas con un estatus socioeconómico más bajo suelen ser más vulnerables al cambio climático, ya que disponen de menos recursos para hacer frente a sus efectos (Hall et al., 2019).

Ante esta vulnerabilidad, las comunidades han debido desarrollar resiliencia para adaptarse a los efectos del cambio climático, gestionarlos y recuperarse de ellos (Barragán & de Andrés, 2015). La resiliencia puede ayudar a abordar los desafíos del cambio climático en las ciudades al centrarse en la transformación de las estructuras políticas y económicas que perpetúan la vulnerabilidad de las comunidades urbanas. Esto implica poner a las personas y su poder en el centro de la toma de decisiones, y abordar las desigualdades sociales y económicas que hacen que algunas comunidades sean más vulnerables que otras (Bahadur & Tanner, 2014). Algunos aspectos que mejoran la resiliencia urbana, corresponden a la inversión en infraestructuras, esto incluye la construcción de carreteras, puentes y otras infraestructuras que puedan resistir eventos extremos. Por otra parte, desarrollar sistemas de alerta temprana, ayudando a la gente a prepararse y responder a los fenómenos meteorológicos. También es fundamental, promover el desarrollo

sostenible, lo que ayuda a reducir la vulnerabilidad de las personas y las comunidades al cambio climático (Abadie et al., 2020).

Las inundaciones son un desastre natural que afecta a millones de personas en todo el mundo. Cada año, miles de hogares y comunidades enteras son devastadas por las inundaciones, lo que resulta en la pérdida de vidas y propiedades. En este contexto, el tipo de arquitectura residencial puede ayudar a mitigar el riesgo de inundaciones (M.V. & Philip, 2022).

La arquitectura residencial suele estar limitada económicamente (Kunreuther & Weber, 2013), por lo que las medidas de adaptación deben tener en cuenta los aspectos socio económicos, ya que las viviendas dependen de los residentes para su mantenimiento y renovación, lo que lleva a que sólo se realicen las obras más necesarias y asequibles en las viviendas, a menos que los habitantes realicen reformas y desarrollos activamente por su cuenta (G. Liu et al., 2021).

El objetivo de este capítulo es identificar soluciones constructivas para la implementación de viviendas resistentes a inundaciones en Chile. Para lograr esto, se llevará a cabo un análisis de los diferentes tipos de viviendas existentes en el mundo, así como también de las normativas que las rigen. Luego, se evaluará la posibilidad de implementar estas soluciones en Chile a través de un análisis físico-estructural, y se verificará el cumplimiento de la normativa chilena en cada caso. El resultado será una propuesta de soluciones constructivas viables para la construcción de viviendas resistentes a inundaciones en Chile.

## **6.1 Materiales y métodos**

Se pueden incorporar soluciones en las edificaciones para aumentar la resiliencia ante inundaciones a corto plazo, durante y después del evento. Un diseño consciente de edificaciones en zonas inundables incluye la elección de tipologías constructivas o la integración de tecnologías de materiales para mejorar su desempeño frente a la vulnerabilidad a inundaciones (Nillesen, 2022). Además, las viviendas a prueba de inundaciones tienen características que deben ser consideradas al construirlas, como la nivelación de las casas flotantes y las conexiones flexibles de las estructuras móviles, y otras que se describen a continuación.

### 6.1.1 *Principales características que debe tener una vivienda para no ser vulnerable a una inundación costera.*

De acuerdo con la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias de EE. UU. y el Consejo de Diseño de la Construcción de Canadá, para que una vivienda sea menos vulnerable a una inundación costera, debe tener ciertas características (American Society of Civil Engineers, 2014; Coulbourne et al., 2021). Algunas de las principales características son:

- a. **Altura:** La vivienda debe estar construida a una altura adecuada para evitar que el agua de la inundación entre en la casa. La altura de la vivienda debe ser mayor que la altura del nivel de inundación esperado.
- b. **Diseño:** El diseño de la vivienda debe ser adecuado para resistir los efectos del agua y el viento. Las ventanas y puertas deben ser resistentes al viento y tener un sistema de cierre hermético para evitar que el agua entre en la casa.
- c. **Materiales de construcción:** Los materiales de construcción deben ser resistentes al agua y al viento. Los materiales tradicionales, como el ladrillo, la piedra y el hormigón, son más resistentes que los materiales más modernos, como el yeso o el cartón yeso.
- d. **Sistema de drenaje:** La vivienda debe tener un sistema de drenaje adecuado que permita que el agua fluya lejos de la casa. Esto puede incluir canales de drenaje, sistemas de bombeo o un terreno elevado.
- e. **Ubicación:** La ubicación de la vivienda es importante para evitar las inundaciones costeras. La vivienda debe estar construida en una zona elevada o en una colina para evitar que el agua se acumule alrededor de la casa.

### 6.1.2 *Tipos de Viviendas Resilientes a inundaciones*

#### 6.1.2.1 *Viviendas Flotantes*

Las casas flotantes son una opción de vivienda única que se está volviendo cada vez más popular en todo el mundo. Las casas flotantes tienen una larga historia que se remonta a los antiguos egipcios y griegos, quienes construyeron casas flotantes para navegar por los ríos y mares (Dennis & Case, 1977). En la Edad Media, las personas construyeron casas flotantes para escapar de los impuestos y la opresión del gobierno. En los siglos XVIII y XIX, las casas flotantes se convirtieron en una forma popular de vivienda para los trabajadores del canal y los pescadores (Flanagan & Garn, 2003). En

la actualidad, las casas flotantes se han convertido en una opción de vivienda popular en todo el mundo, especialmente en áreas donde el costo de la tierra es alto o donde el espacio es limitado.

Las casas flotantes vienen en una variedad de diseños, desde estructuras simples hasta casas de lujo con todas las comodidades modernas. Algunas casas flotantes son pequeñas y compactas, mientras que otras son grandes y espaciosas (Laternus, 1986). Las casas flotantes también pueden ser permanentes o móviles, lo que significa que pueden ser trasladadas de un lugar a otro. Las casas flotantes se construyen típicamente en una plataforma flotante, que puede ser de madera, metal o fibra de vidrio. Las casas flotantes también pueden estar conectadas a una red eléctrica y de agua, o pueden ser autosuficientes con paneles solares y sistemas de recolección de agua de lluvia (Poulsen Rydborg et al., 2019).

#### 6.1.2.2 Viviendas Anfibias

Las casas anfibias son un tipo de casa flotante que también puede apoyarse en el suelo. Aún están en fase experimental, pero ofrecen una solución prometedora a las inundaciones. Las casas anfibias se construyen igual que las flotantes, pero tienen un cuerpo flotante que se coloca en tierra (Nillesen, 2022).

El uso de casas anfibias como viviendas resistentes a las inundaciones tiene muchas ventajas. En primer lugar, son muy móviles, lo que significa que pueden trasladarse fácilmente a un lugar seguro durante una inundación. En segundo lugar, son muy duraderas y pueden resistir los fuertes vientos y olas que suelen acompañar a las inundaciones. En tercer lugar, son muy eficientes energéticamente, lo que significa que pueden ahorrar dinero en costes de energía. Las casas anfibias también son muy respetuosas con el medio ambiente. Se fabrican con materiales sostenibles y no producen emisiones. Por eso son una buena opción para quienes se preocupan por el medio ambiente (English et al., 2021).

El uso de casas anfibias como viviendas resistentes a las inundaciones tiene algunas desventajas. En primer lugar, su adquisición y mantenimiento pueden resultar caros. Segundo, pueden ser difíciles de encontrar en algunas zonas. En tercer lugar, pueden no ser adecuadas para todo tipo de inundaciones (Poulsen Rydborg et al., 2019).

Según el trabajo de (M.V. & Philip, 2022), El concepto de diseño de la vivienda anfibia consiste en crear una estructura sostenible y resistente que pueda soportar inundaciones (Figura 6-1). La vivienda estará fabricada con materiales ligeros, como fibra de vidrio y paneles de GFRG, resistentes a la corrosión y a los daños causados por el agua. La estructura se apoyará en una base cilíndrica hueca de fibra de vidrio, que le proporcionará flotabilidad y estabilidad. La vivienda también estará equipada con un sistema de postes guía verticales que le permitirán subir y bajar con el nivel del agua.



**Figura 6-1: Propuesta de vivienda y estructura flotante, adaptada de (M.V. & Philip, 2022)**

La casa propuesta en este estudio tiene 3 metros de altura y cuenta con una zona de estar, comedor, cocina y dormitorios. El interior será abierto y espacioso, y los materiales utilizados serán ligeros y sostenibles. La casa será lo más resistente posible a las inundaciones y será un lugar seguro y cómodo para vivir en zonas inundables.

Concepto de diseño:

- Estructura sostenible y resistente hecha de materiales ligeros.
- Base de cilindro hueco de fibra de vidrio flotante
- Sistema de postes guía verticales para subir y bajar con el nivel del agua.

### Casa propuesta:

- 3 metros de altura
- Zona de estar, comedor, cocina y dormitorios
- Interior abierto y espacioso
- Materiales ligeros y sostenibles
- Resistente a las inundaciones

Las cimentaciones profundas transmiten cargas a capas de suelo más profundas. Los ingenieros deciden el tipo de pilote y su tamaño. Se puede utilizar un pilote hincado con una sección flotante construida con cilindros de fibra de vidrio. El peso del edificio dividido por la superficie del zócalo provoca una presión sobre la tierra situada debajo de los cimientos. La arcilla más blanda puede soportar una presión de apoyo de 50 KN por metro cuadrado según los códigos IS [14]; por lo tanto, el suelo puede soportar la carga de la estructura.

El acceso a los servicios públicos es un reto en edificios anfibios o flotantes. Todos los servicios públicos deben suministrarse del mismo modo que en cualquier otra vivienda residencial en tierra. Se puede construir un nuevo tipo de tubería para las casas flotantes y anfibias que se rompe y repara fácilmente cuando la estructura se eleva o retrocede. Otros servicios públicos se estudiarán en la sección sobre características sostenibles.

La caseta está montada sobre cuatro postes guía de acero inoxidable (cilindros macizos de acero inoxidable de 1.000 mm de diámetro), que permiten que la caseta suba y baje mediante conexiones permanentes con el nivel del agua. Las varillas están colocadas en diagonal para garantizar una estabilidad óptima y un movimiento lateral mínimo en el lado opuesto de la casa. Los residentes pueden entrar en la casa a través de los escalones frontales que conducen al porche y a la puerta principal. Se coloca un tope en la varilla guía a la altura del nivel máximo de inundación desde la parte superior de la cubierta.

La línea de flotación es el punto en el que un edificio empieza a flotar. Un objeto flotará si desplaza una cantidad de agua más pesada que el propio objeto. Esto se conoce como principio de flotación. La caída vertical de un objeto viene dada por la ecuación de Arquímedes (Poso, 2018).

La ecuación de Arquímedes (Ec. 6-1) establece que la fuerza de flotación sobre un objeto es igual al peso del fluido desplazado por el objeto. La fuerza de flotación es lo que hace que un objeto flote. La caída vertical de un objeto es la distancia que el objeto se hundirá por debajo de la superficie del agua. La caída vertical viene determinada por la fuerza de flotación y el peso del objeto.

$$U = \frac{G}{(A \cdot P)} \quad (\text{Ec. 6-1})$$

Donde, U es la caída vertical por debajo de la línea de flotación en m, G, la carga muerta de una estructura construida en KN, A es el área del cuerpo flotante en m<sup>2</sup> y P es la densidad del agua en kN/m<sup>3</sup> (M.V. & Philip, 2022).

La profundidad de los cimientos de una casa flotante puede calcularse calculando las cargas muertas y vivas de todo el edificio. La carga muerta es el peso del propio edificio, y la carga viva es el peso de las personas, muebles y otros objetos que habrá en el edificio. La profundidad de los cimientos puede calcularse dividiendo el peso del edificio por metro cuadrado entre el peso del agua.

En el caso de una casa flotante sujeta a postes guía verticales, no es necesario comprobar la estabilidad de la casa. Los postes guía ayudarán a mantener la casa flotante en posición vertical, aunque esté parcialmente sumergida.

### 6.1.2.3 Viviendas de pilotes

Las casas de pilotes o palafitos son edificios elevados sobre postes que evitan inundaciones y erosión. Pueden construirse en zonas con inundaciones regulares sin reducir la capacidad de almacenamiento de agua. Son más fáciles de ajustar y elevar que las casas de montaje, construidas con materiales ligeros, como la madera o el bambú. Suelen ubicarse sobre zonas aluviales y zonas costeras. Se encuentran en muchas partes del mundo, como África, Asia, América y Oceanía. Están diseñadas para elevarse sobre el suelo con el fin de protegerlas de las inundaciones y otros desastres naturales (Nillesen, 2022).

Los pilotes han sido utilizados durante siglos por personas de todo el mundo. Algunos de los primeros testimonios de casas sobre pilotes se remontan al Neolítico, cuando los habitantes de Europa y Asia empezaron a construirlas en las orillas de lagos y ríos. También los utilizaban los antiguos egipcios, griegos y romanos.

En América, los nativos americanos utilizaron los pilotes durante siglos. Los indios seminolas de Florida, por ejemplo, construían unos pilotes llamados chickees, hechos de hojas de palmito y madera (Edwards et al., 1998). Se elevaban sobre el suelo para protegerlos de las inundaciones y los mosquitos. En el siglo XIX, los pilotes se hicieron populares en Estados Unidos, sobre todo en el sur. Las casas se construían en las orillas del río Misisipi y sus afluentes para protegerlas de las inundaciones (Kolker et al., 2014).

En Chile, la construcción sobre pilotes es altamente popular en la isla de Chiloé, donde se denominan “palafitos”, estas, son una serie de viviendas construidas sobre pilares de madera que se encuentran en la costa. Estas casas se originaron en el siglo XIX, cuando los pescadores de la zona necesitaban un lugar para almacenar sus herramientas y redes de pesca. Con el tiempo, los palafitos se convirtieron en hogares permanentes para los pescadores y sus familias (Hurtado Saldias et al., 2018).

Los palafitos se construyen en la costa debido a la tradición pesquera de la isla. Los pescadores solían almacenar sus herramientas y redes en las casas construidas sobre pilotes para protegerlas de las mareas. La mayoría de las casas tienen una estructura de madera con techos de cinc o tejas, y están pintadas en colores brillantes (Rivera Campos & Tendero Caballero, 2021).

En Chile, a diferencia del diseño de viviendas anfibia, si existe un marco normativo para el diseño de viviendas sobre pilotes, la norma que establece las condiciones de diseño estructural es la NCh433.Of96 "Diseño Sismorresistente - Cargas y Fuerzas - Parte 2: Diseño Estructural". Esta norma establece los requisitos para el diseño de estructuras sismorresistentes, incluyendo las viviendas sobre pilotes, con el fin de garantizar su seguridad y resistencia ante eventos sísmicos. También se deben considerar otras normas y reglamentos específicos para la construcción de viviendas, como la NCh430.Of2008 "Diseño de estructuras de madera", la NCh1537.Of2009 "Diseño estructural – Cargas permanentes y cargas de uso" y la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC), que establece los requisitos técnicos y normativos para la construcción de edificaciones en todo el territorio nacional.

Para el diseño de pilares según la norma NCh433, se deben realizar los siguientes cálculos:

- Cálculo de la carga axial máxima que soportará el pilar.
- Cálculo de la carga lateral máxima que soportará el pilar.
- Cálculo de la carga excéntrica máxima que soportará el pilar.
- Selección del material a utilizar en el pilar y cálculo de su resistencia a la compresión.
- Cálculo de la resistencia a la flexión del pilar.
- Cálculo de la longitud efectiva del pilar, considerando las condiciones de apoyo y el tipo de conexión.
- Verificación de la estabilidad lateral del pilar.
- Verificación de la estabilidad global del sistema estructural.

En el caso de los tabiques, según la norma NCh433, se deben realizar los siguientes cálculos:

- Cálculo de la carga vertical máxima que soportará el tabique.
- Selección del material a utilizar en el tabique y cálculo de su resistencia a la compresión.
- Cálculo de la resistencia a la flexión del tabique.
- Cálculo de la longitud efectiva del tabique, considerando las condiciones de apoyo y el tipo de conexión.
- Verificación de la estabilidad lateral del tabique.
- Verificación de la estabilidad global del sistema estructural.

Estos cálculos son necesarios para asegurar que el tabique cumpla con las especificaciones de resistencia y estabilidad requeridas por la norma NCh433. Además, es importante considerar las cargas de viento y sismo que puedan afectar a la estructura y realizar los cálculos correspondientes para asegurar su estabilidad ante estas condiciones.

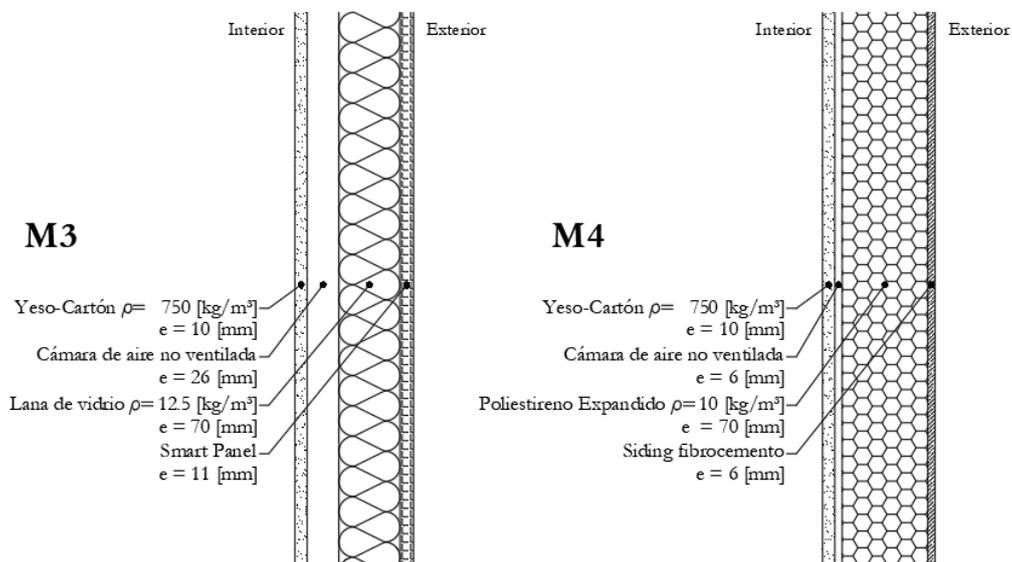
### 6.1.3 *Modelo experimental*

Debido a que el Gobierno de Chile, está estudiando la elaboración de una normativa específica para la construcción de viviendas anfibia. Se propone un modelo experimental, para zonas con riesgo de inundación. Según lo presentado en los capítulos anteriores, la ciudad de Valdivia en la región de Los Ríos será la zona

elegida para emplazar la vivienda. Cabe señalar, que se utilizará la misma tipología de vivienda para el diseño de pilotes.

Para determinar una vivienda tipo, se establece el tamaño promedio de una vivienda social en Chile, el cual varía según el programa habitacional y la región del país. Según datos del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (Minvu), el tamaño promedio de una vivienda social construida en el marco del Programa de Integración Social y Territorial (PIST) es de aproximadamente 50 metros cuadrados.

Por otro lado, se asignaron diferentes soluciones constructivas (Figura 6-2) para los muros basadas en los materiales y construcciones más utilizados para viviendas de madera en la ciudad. Estos materiales y construcciones se obtuvieron del trabajo de titulación "Tipología de la vivienda en la región de Los Ríos" (Borquez & Cardenas, 2022). Se consideraron soluciones constructivas para muros en viviendas donde el material estructural principal era la madera. Las soluciones más representativas incluyen un revestimiento de yeso cartón, lana de vidrio y revestimiento exterior de Smart panel, y un revestimiento de yeso cartón, poliestireno expandido y revestimiento exterior de Siding fibrocemento.



**Figura 6-2: Soluciones constructivas para muros perimetrales.**

En caso de las techumbres, se utiliza lo propuesto en el trabajo de titulación "Diseño de soluciones constructivas de una vivienda tipo, para reducir las emisiones de carbono, en regiones del sur de Chile" (Sanhueza et al., 2022). En la Figura 5 se muestra el escantillón de la Solución Convencional 1 (SC1) la cual corresponde a un

sistema estructural de madera de pino de 2"x6" para vigas de techumbre, con placa arriostrante de OSB 11,1 [mm] y teja asfáltica, con aislación de Poliéstireno Expandido (EPS) de espesor variable según exigencias térmicas de la zona (Figura 6-3).

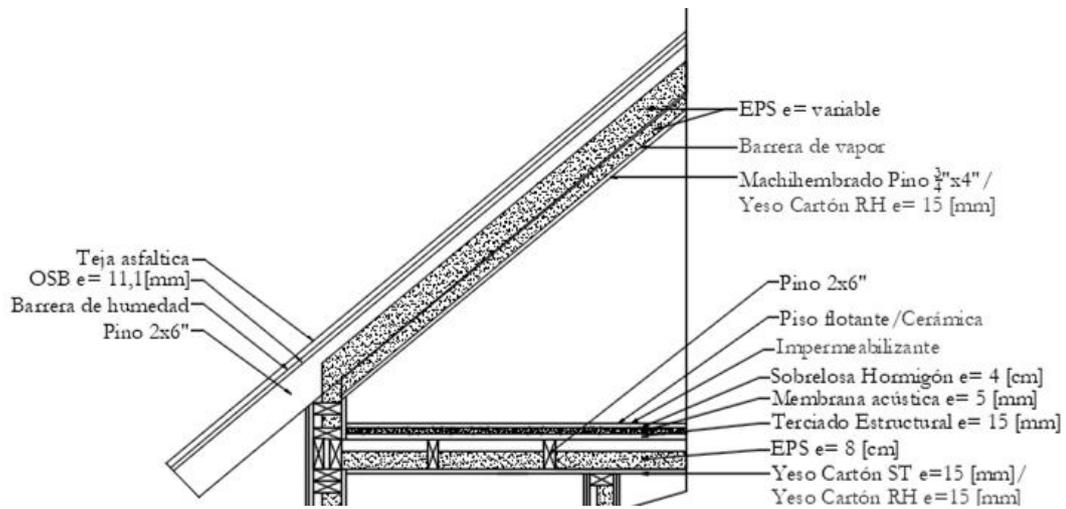
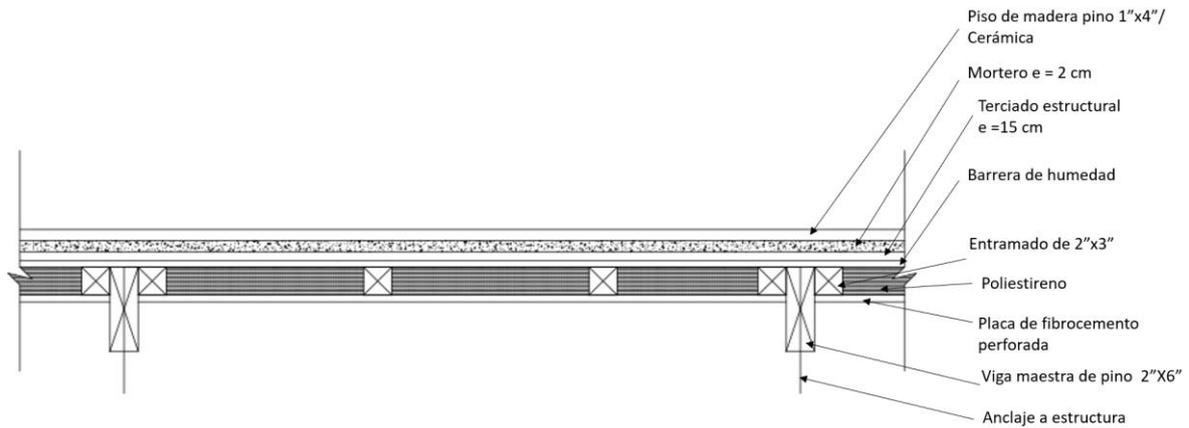


Figura 6-3: Solución constructiva para techumbre

La estructura de un suelo de una casa con soportes de madera está formada por los siguientes componentes:

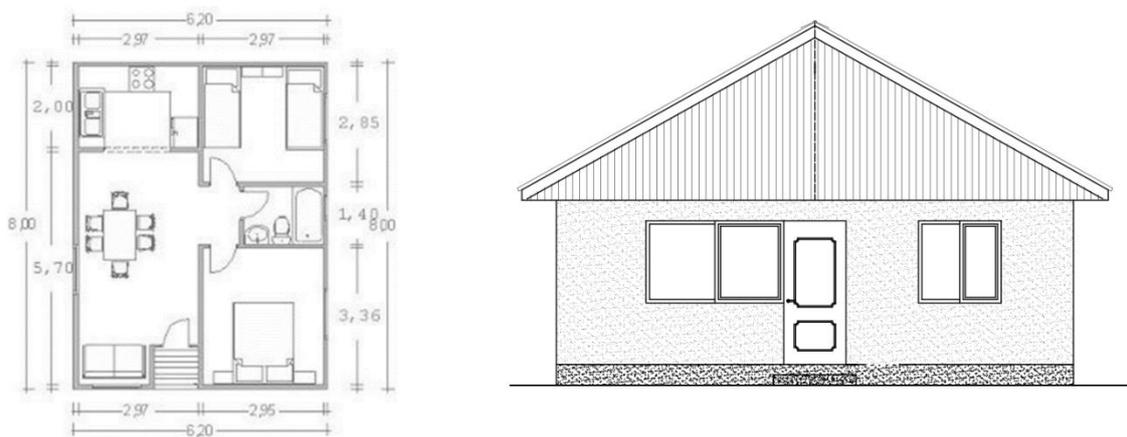
- Vigas: Son los soportes horizontales que soportan el entramado. Suelen ser de madera o acero y están separadas entre sí de 60 a 120 cm.
- Entramado: Son las vigas horizontales que soportan el suelo. Son de madera impregnada y están separadas entre sí a 40 cm.
- Placa de Subsuelo: Es la capa de madera que se coloca perpendicular a las vigas y sirve de base para el suelo de acabado. Será de madera contrachapada de 18 mm.
- Suelo de acabado: Es la capa superior del suelo que proporciona la superficie sobre la que se camina, será de tablas de 1X4". Además, se recomienda un enchapado de 2cm de mortero, para nivelación.

El entramado, las vigas y la placa se unen con clavos o tornillos. El subsuelo se clava o atornilla al entramado, y el suelo de acabado se clava o pega al subsuelo (Figura 6-4).



**Figura 6-4: Solución constructiva para piso**

En cuanto a la distribución espacial, presentada en la Figura 6-5, las áreas están dispuestas simétricamente para aumentar la estabilidad.



**Figura 6-5: Planos 2D y elevación de la casa propuesta**

## 6.2 Resultados

### 6.2.1 Análisis Normativo

Como se ha mencionado anteriormente en este documento, Chile cuenta con una amplia normativa que regula el diseño de casas sobre pilotes. Sin embargo, no existe un marco normativo específico para el diseño de casas anfibia en este país. Por lo tanto, es necesario recopilar información sobre las normativas aplicadas en otros países y luego evaluar su potencial aplicabilidad en Chile, a través de un análisis comparativo de la Tabla 6-1.

Los países que cuentan con la normativa más desarrollada para la construcción de viviendas anfibia son los Países Bajos, Dinamarca y Estados Unidos:

- Los Países Bajos tienen una larga historia de convivencia con el agua y, por ello, cuentan con algunas de las normativas más estrictas para la construcción de viviendas anfibia. Estas normativas están diseñadas para garantizar que las viviendas anfibia sean seguras y que no supongan un riesgo para el medio ambiente.
- Dinamarca es otro país que tiene una larga historia de convivencia con el agua. En los últimos años, Dinamarca se ha convertido en líder en el desarrollo de viviendas anfibia. El gobierno danés ha invertido mucho en investigación y desarrollo, y también ha creado una serie de incentivos para la construcción de viviendas anfibia.
- Estados Unidos es un actor relativamente nuevo en el campo de las viviendas anfibia. Sin embargo, cuenta con varias empresas que desarrollan y fabrican viviendas anfibia. El gobierno estadounidense también está empezando a interesarse por las viviendas anfibia y está estudiando una serie de políticas para promover su desarrollo.

### 6.2.2 Códigos de construcción europeos

Como se señaló anteriormente, Los Países Bajos son uno de los países líderes en el desarrollo de casas anfibia. El gobierno holandés ha desarrollado una serie de indicaciones para la construcción de casas anfibia, estas están contenidas en el Decreto Nacional de Construcción de 2012 que entró en vigor el 1 de enero de 2015, el cual regula los diseños para garantizar que sean seguras y respetuosas con el medio ambiente.

Algunos de los requisitos clave de los códigos de construcción holandeses para las casas anfibia son (Dutch Ministry of Infrastructure and Water Management, 2022; Van Overveld et al., 2011):

- La casa debe ser capaz de resistir las fuerzas del agua y las olas.
- La casa debe estar construida con materiales resistentes al agua.

- La casa debe estar equipada con un sistema de alcantarillado y un sistema de suministro de agua.
- La casa debe estar situada en una zona que no sea propensa a las inundaciones.

### 6.2.2.1 Códigos de construcción estadounidenses

Estados Unidos es otro país que ha desarrollado códigos de construcción para casas anfibia. La Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE) ha elaborado una serie de directrices para el diseño y la construcción de casas anfibia. Estas directrices no son obligatorias, pero son ampliamente seguidas por constructores y promotores. Algunos de los requisitos clave de las directrices de la ASCE para casas anfibia son (American Society of Civil Engineers, 2014):

- La casa debe resistir las fuerzas del agua y las olas.
- La casa debe estar construida con materiales resistentes al agua.
- La casa debe estar equipada con un sistema de alcantarillado y un sistema de suministro de agua.
- La casa debe estar situada en una zona no inundable.

**Tabla 6-1: Comparativa de los aspectos más importantes de cada una de las normas:**

<b>Requerimientos</b>	<b>Dutch National Building Decree 2012</b>	<b>ASCE Guidelines for Amphibious Houses</b>
<b>Nivel del Agua</b>	1,2 metros por encima del NAP	1,5 metros por encima del NAP
<b>Velocidad del viento</b>	120 kilómetros por hora	150 kilómetros por hora
<b>Altura de ola</b>	2 metros	3 metros
<b>Fundaciones</b>	Debe poder soportar fuerzas de elevación	Debe poder soportar fuerzas de elevación y fuerzas laterales
<b>Estructura</b>	Debe poder soportar cargas estructurales	Debe poder soportar cargas estructurales y cargas dinámicas
<b>Envolvente</b>	Debe ser estanco al agua y al aire	Debe ser estanco al agua y al aire
<b>Servicios</b>	Debe poder resistir inundaciones	Debe poder resistir inundaciones
<b>Accesos</b>	Debe tener un medio seguro de acceso y salida	Debe tener un medio seguro de acceso y salida

\*\*El NAP (Nivel de Referencia de los Países Bajos) es un sistema de referencia altimétrico utilizado en los Países Bajos para medir la altitud y la profundidad en relación al nivel medio del mar en la costa holandesa

Los códigos de construcción de casas anfibia en Europa y Estados Unidos son similares en muchos aspectos. La principal diferencia es que las directrices de la ASCE establecen requisitos más estrictos para la velocidad del viento y la altura de las olas. Esto se debe a que Estados Unidos es más propenso a los huracanes y otras tormentas severas que Holanda, mientras que los códigos de construcción holandeses son más estrictos que los estadounidenses en lo que respecta a los requisitos de resistencia y durabilidad de las casas anfibia.

El Gobierno de Chile aún no ha elaborado una normativa específica para la construcción de viviendas anfibia. En el caso de adoptar la Normativa Holandesa, se debe tener algunas consideraciones adicionales para la aplicación en Chile: como el clima de este país es más variable que el de los Países Bajos, donde se elaboró el decreto. Esto significa que el gobierno chileno puede tener que ajustar el decreto para tener en cuenta las diferentes condiciones climáticas. Además, el gobierno de Chile también puede tener que considerar las necesidades específicas de la población del país, a la hora de desarrollar normativas para las casas anfibia. Por ejemplo, puede que el gobierno tenga que asegurarse de que las casas anfibia sean asequibles para las familias con bajos ingresos. Otros aspectos relevantes a considerar a la hora de desarrollar normativas para estas viviendas son la actividad sísmica en Chile, la disponibilidad de terrenos adecuados para la construcción de casas anfibia, el coste de construcción de las casas anfibia y su demanda.

En cuanto a las directrices de la ASCE, se debería tener en cuenta, las condiciones del suelo en Chile pueden ser muy diferentes a las de Estados Unidos. Por lo que sería fundamental un estudio geotécnico para asegurarse de que los cimientos de la casa anfibia estén diseñados adecuadamente para las condiciones locales del suelo. La relevancia de la actividad sísmica en Chile también es mucho mayor que en muchas zonas de Estados Unidos.

En general, las directrices de la ASCE proporcionan un buen punto de partida para el desarrollo de normativas para las casas anfibia en Chile. Sin embargo, el gobierno de Chile deberá tener en cuenta las consideraciones mencionadas con anterioridad a la hora de desarrollar esta nueva normativa.

### 6.2.3 Cálculo de pesos para el diseño de soluciones frente a inundaciones

Para realizar el diseño de los elementos flotantes o soportantes, es necesario primero establecer los pesos de la estructura y modulo completo de las dos opciones de viviendas. Para ello en la Tabla 6-2, se presentan las áreas y pesos de cada elemento.

**Tabla 6-2: Pesos de la superestructura y elementos secundarios para cada vivienda**

<b>Muros</b>			
<b>Tipo M3</b>			
<b>Elemento</b>	Area (m2)	Peso elemento (kg/m2)	Peso total (kg)
<b>Yeso carton</b>	120.72	7.5	905.4
<b>Camara de aire no ventilada</b>	120.72	0	0
<b>Lana de vidrio</b>	120.72	0.875	105.63
<b>Smart panel</b>	120.72	7.73	933.1656
<b>Total (Kg)</b>			<b>1944.1956</b>
<b>Tipo M4</b>			
<b>Elemento</b>	Area (m2)	Peso elemento (kg/m2)	Peso total (kg)
<b>Yeso carton</b>	120.72	7.5	905.4
<b>Camara de aire no ventilada</b>	120.72	0	0
<b>Poliestireno expandido</b>	120.72	0.7	84.504
<b>Siding fibrocemento</b>	120.72	9.34	1127.5248
<b>Total (Kg)</b>			<b>2117.4288</b>
<b>Techumbre</b>			
<b>Diagonal</b>			
<b>Elemento</b>	Area (m2)	Peso elemento (kg/m2)	Peso total (Kg)
<b>Teja asfaltica</b>	27.36	7	191.52
<b>OSB</b>	27.36	7.65	209.304
<b>Barrera de humedad</b>	27.36	0	0
<b>EPS</b>	27.36	3	82.08
<b>Barrera de vapor</b>	27.36	0	0
<b>Yeso carton RH</b>	27.36	35	957.6
<b>Machilebrado pino 3/4 x 4</b>	294.12	0.94	276.47
<b>Pino 2x6</b>	47.88	2.76	132.15
<b>Total (Kg)</b>			<b>1849.1256</b>

<b>Diagonal</b>			
<b>Elemento</b>	<b>Area (m2)</b>	<b>peso elemento (kg/m2)</b>	<b>Peso total (Kg)</b>
<b>Ceramica</b>	49.6	1.11	55.056
<b>Impermeabilizante</b>	49.6	0	0
<b>Sobrelosa de hormigon</b>	49.6	48	2380.8
<b>Terciado estructural</b>	49.6	7.74	383.904
<b>EPS</b>	49.6	2	99.2
<b>Yeso carton St</b>	39.5	11.8	466.1
<b>Yeso carton Rh</b>	10.1	35	353.5
<b>Pino 2x6</b>	120	2.76	331.20
<b>Tota (Kg)</b>			<b>4069.76</b>
<b>Suelo</b>			
<b>Elemento</b>	<b>Area (m2)</b>	<b>Peso (kg/m)</b>	<b>Peso total (Kg)</b>
<b>Barrera de humedad</b>	-	-	-
<b>Entramado 2x3</b>	160	1.21	193.6
<b>Poliestireno</b>	-	-	-
<b>Viga maestra de pino 2x6</b>	48	2.76	132.48
	<b>Area (m2)</b>	<b>Peso elemento (Kg/m2)</b>	<b>Peso total (Kg)</b>
<b>Mortero</b>	49.6	48	2380.8
<b>Terciado estructural</b>	49.6	7.74	383.904
<b>Placa de fibrocemento perforada</b>	49.6	3	148.8
<b>Ceramica</b>	49.6	1.11	55.056
<b>Tota (Kg)</b>			<b>3294.64</b>
<b>Peso para vivienda con muro tipo M3</b>			<b>11157.7212</b>
<b>Peso para vivienda con muro tipo M4</b>			<b>11330.9544</b>

Por otro lado, se deberá considerar un peso adicional, correspondiente a las sobre carga de uso (NCh 1537, 2009), el cual contempla, es de 200 kg/m2. Este valor se refiere, tanto a las personas como todos los elementos, tales como muebles, camas, electrodomésticos, etc., presentes en una vivienda. Para esta vivienda de 50 m2, el peso de carga viva sería de 10000 Kg

Por lo tanto, los pesos totales de las viviendas son, con muro M3 = 21.16 ton y para muro M4 = 21.33 ton.

#### 6.2.4 Diseño Casa anfibia

Con los antecedentes del peso de la estructura, se procede a determinar los elementos para la flotabilidad, utilizando el método desarrollado por (M.V. & Philip, 2022), se recomiendan 11 tubos de fibra de vidrio de 8.2 m de largo y 0,6 m de diámetro, las cuales pueden desplazar una cantidad de agua equivalente a 24,860 m<sup>3</sup>. El peso del agua desplazada es de 24860 kg, lo que es mayor que el peso total de la estructura, incluyendo la base flotante, que es de 21160 o 21330 kg, dependiendo de la solución adoptada. La variación entre ambos pesos más desfavorable será de 3530 kg a favor de la flotabilidad, la disposición del sistema de tubería puede verse en la Figura 6-6.

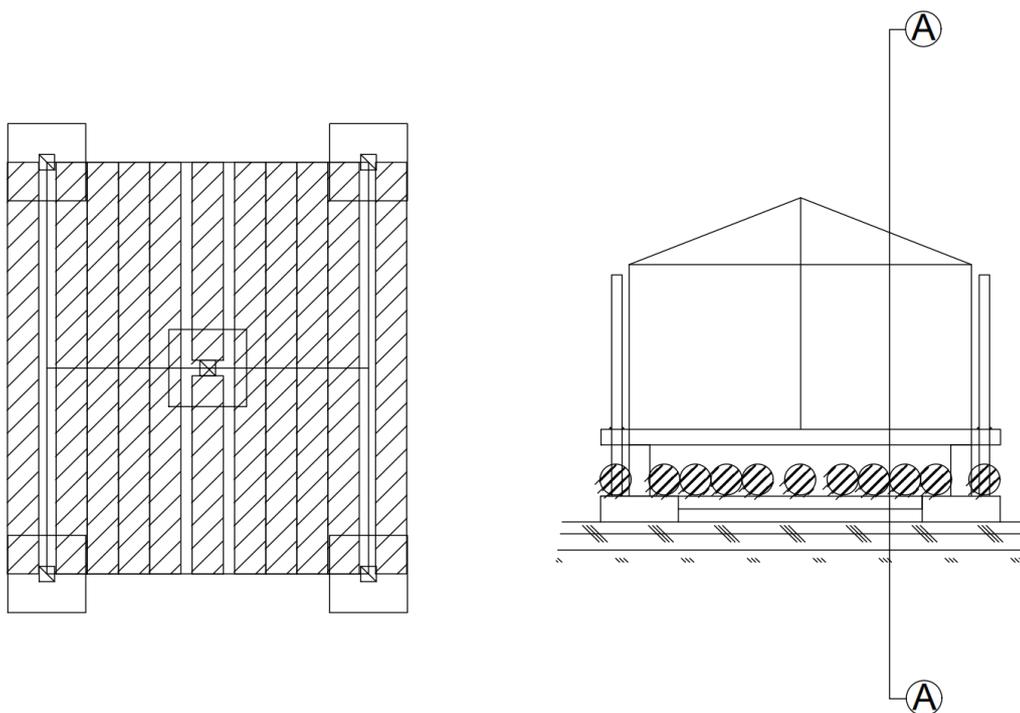
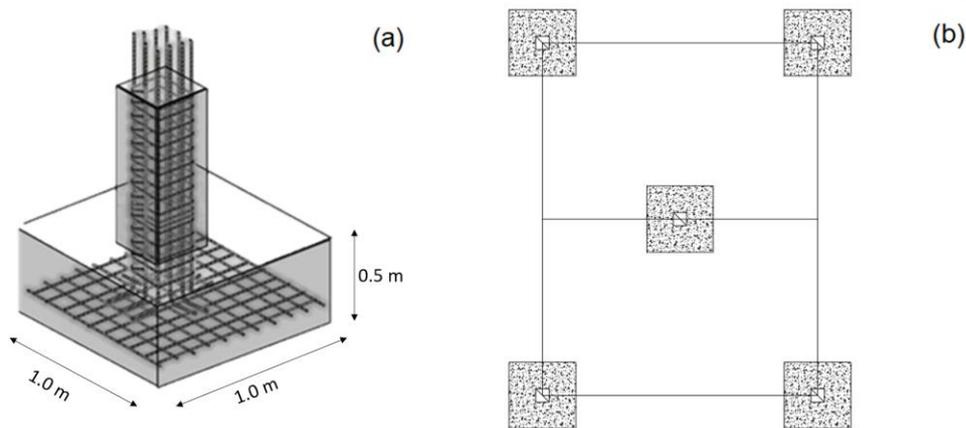


Figura 6-6: Disposición de los tubos de fibra de vidrio, tanto en planta como en vista alzada.

Para la ecuación de Arquímedes para la caída vertical Eq. 6-1, la caída vertical por debajo de la línea de flotación, U en metros, será igual a la carga muerta de la estructura construida  $G$  en  $\text{KN} = 21330 \text{ Kg} = 213,33 \text{ KN}$ , por otro lado, A es el área del cuerpo flotante en  $\text{m}^2 = 50 \text{ m}^2$  y P es la densidad del agua en  $\text{kN/m}^3 = 10\text{kN/m}^3$ . Entonces,  $U = 213.33 / (50 \times 10) = 0.43 \text{ m}$ , por lo que será recomendable adoptar un

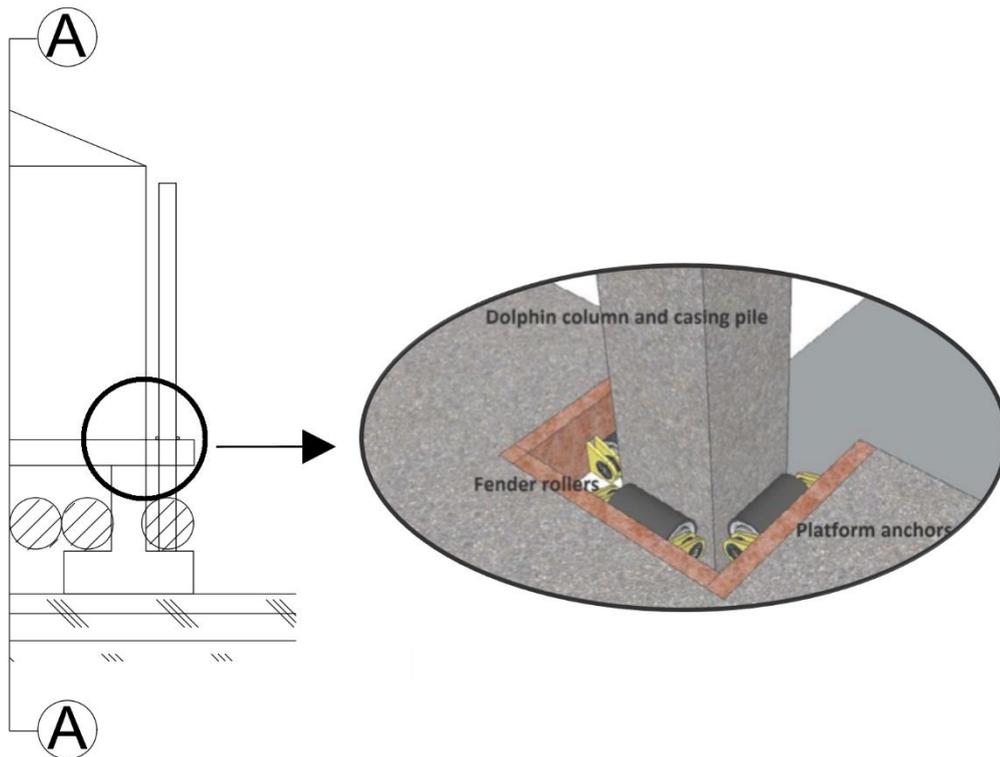
mínimo de 1 m. Lo cual, se debe excavar desde la base de la base flotante por debajo del nivel del suelo. No es obligatorio comprobar la estabilidad de la casa propuesta, ya que la casa está unida a postes guía verticales.

Para el cálculo de las fundaciones, se utilizarán zapatas aisladas, como se observan en la Figura 6-7a, las cuales tienen una dimensión de 1.0 m por 1.0 m y espesor de 0.5 m, siendo verificadas al corte y volcamiento. Estas serán dispuestas bajo la estructura flotante, según lo ilustrado en la Figura 6-7b.



**Figura 6-7: (a) Esquema de tipo de zapata aislada y sus dimensiones propuestas. (b) Distribución de zapatas aisladas bajo la superficie de la casa anfibia.**

Para los postes guía, serán cuatro postes de acero inoxidable de sección 20x20 cm, los cuales se interconectarán a la estructura flotante de la casa, El sistema de amarre vertical se anclarán a la plataforma, por medio de los rodillos de defensa (Koh et al., 2008). La Figura 6-8 ilustra este sistema, qui se pude ver, como los rodillos de los pilotes transmiten las cargas horizontales al sistema lateral. Estos permiten que la casa se mueva hacia arriba y hacia abajo a través de conexiones permanentes al nivel del agua. Los residentes pueden acceder a la casa por los escalones que conducen al porche y la puerta principal. Además, se coloca un tope en el poste de guía a la altura del nivel máximo de inundación desde la parte superior de la plataforma (Nekooie et al., 2017).



**Figura 6-8: Ejemplo de anclaje y deslizamiento de los postes guías a la estructura flotante de la casa (Adaptado de (Nekooie et al., 2017)).**

### 6.2.5 Diseño Casa palafito

Para el caso del diseño de los pilotes de esta vivienda, se seguirá una distribución de elementos, como lo indicado en la Figura 6-9. Con un total de 13 pilotes, se realizará una verificación para un suelo del área de estudio desfavorable, del tipo limo arenoso con  $\sigma_{adm} = 0.5 \text{ kg/cm}^2$ .

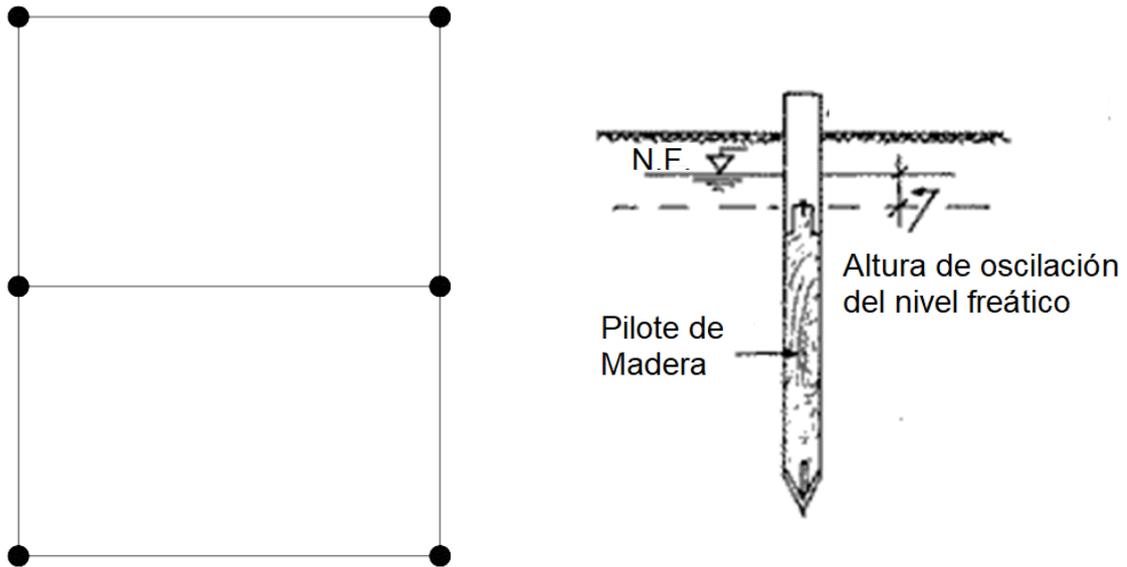


Figura 6-9: Distribución de pilotes y detalle de pilote de madera a instalar

Inicialmente se cuenta con carga permanente y sobrecarga de uso, para vivienda pequeña, según los siguientes valores:

$$P_D = 11.3 \text{ Tonf}$$

$$P_L = 10 \text{ Tonf}$$

Al optar por solución consistente en pilotes de madera, distribuidos en seis elementos con separaciones de 6 y 4 metros, respectivamente, en dos direcciones, debe tenerse en consideración que la longitud máxima de la mayoría de los pilotes de madera fluctúa entre 10 m y 20 m, siendo necesario que la madera sea recta, resistente y sin defectos. El “*Manual of Practice*”, Núm. 17 (1959) de la *American Society of Civil Engineers* estipularía que el tipo de función requerida exigiría usar pilotes de *Clase B*, para lo cual el diámetro mínimo debiera fluctuar entre 305 a 330 mm, cuya presión de servicio será de  $P_{serv} = 3.55 \text{ Tonf}$ , este valor debe ser menor que la capacidad de la punta del pilote.

Los pilotes de madera no soportan esfuerzos altos de hincado, por lo que la capacidad del pilote se encuentra limitada para evitar aplastamiento de las fibras, debido a los golpes de martinete, fenómeno también conocido como *astillado*.

Al suponer una baja capacidad de soporte en el suelo, para lo cual resultaría antieconómico extender en demasía la longitud de cada pilote, hasta hallar roca basal o substrato más resistente, se puede considerar diseño de cada elemento por

resistencia a la fricción y adhesión lateral, además de la capacidad en la punta que suele ser baja en estos casos.

En cuanto a la resistencia o capacidad soportante de un pilote, considerando la teoría de Vesic (Ec. 6-2) para expansión de cavidades, se tendría (para un pilote de madera de 12 metros de longitud):

$$Q_p = A_p \bar{\sigma}'_0 N_{\sigma}^* \text{ (Ec. 6-2)}$$

Donde  $Q_p$ , capacidad de la punta del pilote,  $A_p$ , corresponde al área de la punta del pilote,  $\bar{\sigma}'_0$ , es el esfuerzo efectivo normal medio del terreno al nivel de la punta del pilote,  $N_{\sigma}^*$ , corresponde al factor de capacidad de carga. En el caso del área de estudio se tiene:

Suelo limoso en Valdivia:  $\gamma \approx 0.82 \frac{\text{Tonf}}{\text{m}^3}$

Ángulo de fricción interna:  $\phi \approx 27^\circ$

Cohesión:  $c \approx 2,13 \text{ kPa}$

Área de pilote:  $A_p = 0.07 \text{ m}^2$

Presión efectiva:

$$q' = \gamma \cdot h = 0.82 \frac{\text{Tonf}}{\text{m}^3} \cdot 12 \text{ m} = 9.84 \frac{\text{Tonf}}{\text{m}^2} = 0.984 \frac{\text{Kgf}}{\text{cm}^2} \text{ (Ec. 6-3)}$$

Esfuerzo efectivo normal, por ejemplo, para limo arenoso:

$$K_0 = 1 - \sin(27) = 0.5616 \text{ (Ec. 6-4)}$$

$$\bar{\sigma}'_0 = \frac{1+2K_0}{3} q' = \frac{1+2 \cdot 0.5616}{3} \cdot 9.84 \frac{\text{Kgf}}{\text{cm}^2} = 96.50 \frac{\text{Kgf}}{\text{cm}^2} \text{ (Ec. 6-5)}$$

De acuerdo con la teoría de Vesic,

$$N_{\sigma}^* = f(I_{rr}) \text{ (Ec. 6-6)}$$

Donde  $I_{rr}$ , corresponde al índice de rigidez reducida para el suelo, la que se obtiene de la Ec. 6-7:

$$I_{rr} = \frac{I_r}{1+I_r \Delta} \text{ (Ec. 6-7)}$$

$\Delta$ , corresponde a la deformación unitaria volumétrica promedio en la zona plástica debajo de la punta del pilote. Por otro lado, los intervalos de  $I_r$ , para un suelo limo

arenoso, está en el orden de 70 (Das, 2010). Con estos datos, se puede obtener  $\Delta$  de la Ec. 6-8:

$$\Delta = 0.005 \left(1 - \frac{\phi' - 25}{20}\right) \frac{q'}{p_a} \text{ (Ec. 6-8)}$$

Con  $p_a$ , como presión atmosférica ( $\approx 100 \text{ kN/m}^2$ )

Con lo anterior, se tiene un valor de  $\Delta = 0.00044 \text{ m}$ , con lo que es posible calcular el valor de  $I_{rr} = 58.46$ . Ahora, de la tabla 11.7 del libro de Fundamentos de ingeniería de cimentaciones (Das, 2010), se puede obtener  $N_{\sigma}^*$ , con un  $\phi \approx 27^\circ$ , este factor de soporte será de 29.29.

Luego reemplazamos en Ec. 6-2, para determinar capacidad de la punta del pilote  $Q_p = 12.615 \text{ Tonf}$ . La normativa chilena, exige considerar un factor de seguridad de 3 a 5 en estos casos (Urbina & Ramirez, 2003), por lo que el factor será de al menos 4.5, lo que da un  $Q_{adm} = Q_p / (3.5) = 3.19 \text{ Tonf}$ .

Finalmente se verifica que  $Q_{adm} >$  que  $P_{serv}$ , por lo tanto, la sección y longitud del pilote, cumple con los requerimientos de carga.

### 6.3 Discusión

Las casas sobre pilotes y las viviendas anfibia están diseñadas para ser utilizadas en zonas propensas a las inundaciones. Cabe mencionar, que las casas sobre pilotes suelen ser más asequibles y fáciles de construir, mientras que las viviendas anfibia suelen ser más duraderas y capaces de resistir las fuerzas del agua y las olas, en la Tabla 6-3, se ha realizado una comparativa entre ambas soluciones constructivas:

**Tabla 6-3: Comparación entre viviendas anfibia y palafitos:**

	<b>Palafitos</b>	<b>Anfibia</b>
<b>Diseño</b>	Las casas sobre pilares suelen construirse con materiales ligeros, como la madera o el bambú, y están diseñadas para elevarse sobre el suelo con el fin de protegerlas de las inundaciones y otros desastres naturales	Las viviendas anfibia suelen construirse con materiales más duraderos, como acero u hormigón, y están diseñadas para resistir la fuerza del agua y las olas.
<b>Ventajas</b>	Los palafitos ofrecen una serie de ventajas, como protección contra inundaciones, plagas y aluviones. También pueden proporcionar mejor ventilación e intimidad que las casas	Las viviendas anfibia ofrecen una serie de ventajas, como la posibilidad de moverse con las mareas, la capacidad de resistir inundaciones y la posibilidad de ser utilizadas en

	construidas sobre el suelo.	diversas actividades acuáticas.
<b>Desventajas</b>	Las casas sobre pilares pueden ser más caras de construir y mantener que las construidas sobre el suelo. También pueden ser más vulnerables a las tormentas y otros desastres naturales.	Las viviendas anfibiaas pueden ser más caras de construir que las casas sobre pilotes. También pueden ser más difíciles de acceder y mantener.

El mantenimiento de ambos tipos de casas es más restrictivo debido a la necesidad de usar materiales que no contaminen el agua y al desafío de limpiar las superficies y espacios públicos después de una inundación. La privacidad es un problema en estas casas ya que no es posible construir vallas o setos en los límites de la propiedad.

Es importante señalar que las normas de construcción de casas anfibiaas evolucionan constantemente. A medida que se desarrollen nuevas tecnologías y materiales, los códigos se actualizarán para reflejar estos cambios. Si está pensando en construir una casa anfibia, es importante que consulte a un arquitecto o ingeniero cualificado para asegurarse de que su casa cumple todos los códigos de construcción aplicables.

Cabe mencionar, que independiente al diseño adaptativo de las viviendas frente a un evento de inundación, deben existir estrategias orientadas a la protección de los usuarios, las que son fundamentales para proteger a las personas afectadas por una inundación. Las condiciones de desastre en zonas de inundación pueden ser extremadamente peligrosas, con riesgos como la subida del nivel del agua, los escombros y los riesgos eléctricos (Huang, 2018). Por lo tanto, es importante contar con una respuesta de emergencia inmediata que incluya acciones como la evacuación y el rescate. Las consecuencias inmediatas de una inundación pueden ser devastadoras, y es necesario tomar medidas para ayudar a las personas a recuperarse de la catástrofe. El refugio de evacuación es una forma importante de proporcionar alojamiento temporal y otro tipo de asistencia a las personas que han sido desplazadas por una inundación (Chanson & Brown, 2018).

En este capítulo se presentan diversas opciones constructivas para hacer que las casas sean más resistentes a las inundaciones, como elevar su altura, utilizar materiales impermeables e instalar sistemas de drenaje. Dos tipos de viviendas que se están volviendo populares son las casas anfibias y las casas sobre postes. Las casas anfibias son una alternativa prometedora debido a su capacidad de movilidad, durabilidad, eficiencia energética y uso de materiales sostenibles, aunque su construcción puede ser costosa y requerir lugares adecuados. Por otro lado, las casas sobre postes son más comunes en el sur de Chile y requieren considerar varios factores en su diseño, como el tipo de suelo, la altura del nivel freático, las cargas de viento y sísmicas, y los materiales que se utilizarán. Actualmente, el gobierno de Chile está evaluando la posibilidad de establecer una normativa para la construcción de casas anfibias, sin embargo, existen desafíos específicos a considerar, como la actividad sísmica del país, la disponibilidad de terrenos adecuados y los costos de construcción. Además del diseño de la casa, es importante contar con planes de protección para los habitantes en caso de inundaciones, como planes de emergencia inmediata y alojamiento temporal para personas desplazadas. En conclusión, es fundamental considerar cuidadosamente varios factores para desarrollar una normativa efectiva para las casas anfibias en Chile y garantizar la seguridad y resistencia de estas estructuras ante eventos sísmicos.

## **Capítulo 7. Comportamiento de soluciones constructivas de madera frente a la condensación intersticial en zonas de alta humedad relativa**

Actualmente, una gran cantidad de personas en todo el mundo pasan la mayor parte del tiempo dentro de edificios. Estudios han demostrado que alrededor del 90% del tiempo, el común de la gente se encuentra al interior de algún establecimiento, ya sean sus hogares, trabajos, escuelas, centros comerciales y de recreación, u otras construcciones (Pereira & Ghisi, 2011). Debido a esto es importante el cuidado del desempeño higrotérmico de los recintos, como su durabilidad.

De las variables a controlar, una de las más relevantes, es la humedad al interior de cada establecimiento. Los estudios realizados por Zhang y Yoshino (H. Zhang & Yoshino, 2010) han indicado que la humedad al interior de una edificación está estrechamente relacionada con problemas de salud, consumo de energía y la durabilidad de la envolvente en la construcción. Se afirma que un ambiente con una alta humedad puede afectar a la percepción de la calidad del aire, e incluso favorecer el crecimiento de moho, pudiendo causar problemas respiratorios y alergias (H. Zhang & Yoshino, 2010) en los habitantes de las viviendas con daños por agua, generando el denominado “síndrome del edificio enfermo” (SBS en sus siglas en inglés) (Shoemaker & House, 2006).

La envolvente del edificio es el principal determinante del ambiente interior, responsable de los flujos de calor y del rendimiento térmico (Manioğlu & Yilmaz, 2006), y que la excesiva humedad al interior de una edificación puede traducirse en efectos negativos para los materiales constructivos, al acelerar la pudrición en estos, siendo precisamente este fenómeno el que ha causado el mayor daño en las edificaciones, quedando demostrado bajo los estudios realizados dentro del continente europeo (Leonowicz, 2020), que el daño de la humedad en la estructura de una construcción corresponde al 48.3% del total de los daños, por lo que se necesitan soluciones constructiva a lo largo de los años.

Dentro de las amenazas principales para el control de humedad en los materiales utilizados en la construcción, se encuentra el fenómeno físico de la condensación, ya sea al exterior de las soluciones constructivas como al interior de estas en forma de condensación intersticial, existiendo una relación entre el riesgo de ocurrencia y la

zona climática en la que se encuentra la edificación, siendo las con mayor incidencia aquellas que poseen un clima de verano con alta humedad y un clima de invierno con alta humedad (Manioğlu & Yılmaz, 2006).

A partir de los estudios de la climatología en Chile, se han considerado factores como la humedad y presión de vapor de agua, para el cálculo del comportamiento esperado de la envolvente, como se puede ver en la NCh1973 (INN (Instituto Nacional de Normalización), 2014; Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2022), la que corresponde a una traducción de la normativa internacional ISO13788 (Bellia & Minichiello, 2003; ISO, 2014).

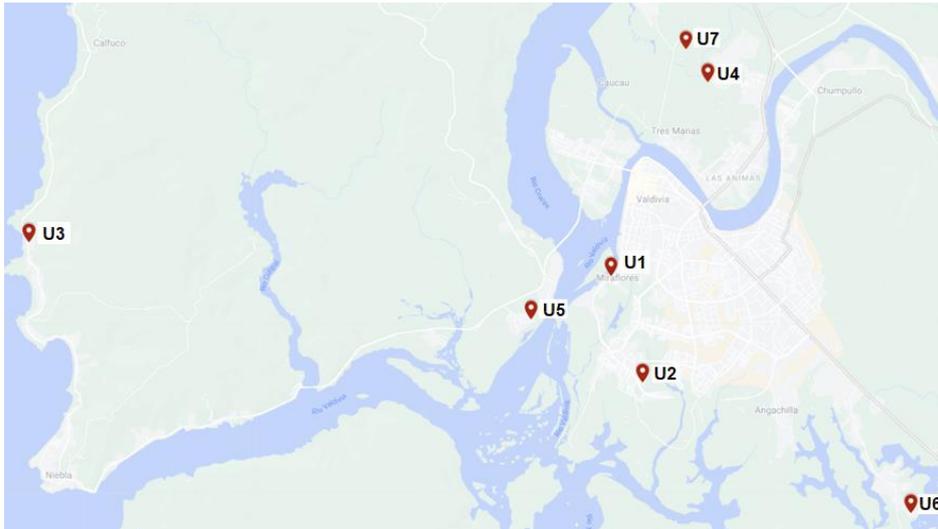
Chile posee una gran variabilidad climática, las zonas del sur del país tiene promedios de precipitaciones mayores a 2000 mm/año, por lo que hace que estas zonas sean afectadas por la humedad en sus soluciones constructivas de las edificaciones. Las cuales en su mayoría tienen varios componentes derivados de la madera, la cual se ha posicionado como el primer material de construcción en Chile para proyectos de vivienda de hasta dos pisos, con un 33,5% del total (Madera 21, 2020), y considerando a este un material altamente sensible a los daños por humedad (Rodríguez et al., 2012). Por este motivo se hace necesario analizar el comportamiento de las diferentes soluciones constructivas aplicadas en las zonas con mayor humedad relativa.

En este estudio se propone considerar las condiciones de temperatura y humedad relativa en las zonas cercanas a grandes masas de agua de la localidad de Valdivia, con clima templado y lluvioso, para obtener las condiciones solicitantes de los modelos constructivos, con mediciones in situ de temperatura y humedad durante el mes de agosto (invierno austral), el cual en presenta una mayor ocurrencia de condensación (Lengfeld & Ament, 2012; Rodríguez et al., 2012). Con esto, se analizará el comportamiento higrotérmico de las diferentes soluciones constructivas típicas, considerando las horas en las que se presentará condensación, para finalmente encontrar soluciones constructivas factibles con y sin la implementación de barreras de vapor, tanto, convencionales como medioambientalmente amigables.

## **7.1 Metodología y Materiales**

### *7.1.1 Ubicación de los puntos de medición*

Para obtener las condiciones exteriores de temperatura y humedad relativa en ubicaciones cercanas a grandes masas de agua durante el mes de agosto de 2022 en la ciudad de Valdivia. Se asignaron seis puntos de medición para mediciones in situ (Figura 7-1), además de una séptima ubicación (U7) con los datos de estación meteorológica fija (AGROMET) (Agromet, 2023), de la cual se obtuvieron los datos históricos de mayo hasta agosto del mismo año.



**Figura 7-1: Ubicaciones puntos de medición**

De estas ubicaciones se destacan en la Tabla 7-1, se muestran las diferentes características asociadas al entorno en el que se encuentran emplazadas.

**Tabla 7-1: Características de ubicaciones medidas**

Ubicación	Características
<b>U1</b>	Nivel del río y a 10 metros de borde poniente del Río Valdivia.
<b>U2</b>	En entorno urbano con cercanías al Humedal Angachilla.
<b>U3</b>	Costa oceánica con pocas construcciones aledañas.
<b>U4</b>	Parcela despejada, sin presencia de construcciones cercanas y al borde de riachuelo.
<b>U5</b>	En entorno urbano con cercanías al borde oriente del Río Valdivia.
<b>U6</b>	Sur de ciudad de Valdivia, rodeado de humedal y río

	Angachilla en un entorno semiurbano de construcciones bajas.
<b>U7</b>	Zona agrícola al norte de la ciudad de Valdivia, sin presencia de construcciones cercanas y fuera del entorno urbano.

## 7.2 Metodología de medición

La obtención de los datos fue realizada a partir de sensores HOBO MX2301A de temperatura y humedad relativa, cuyos datos fueron descargados vía smartphone a través de la aplicación HOBO by Onset (Figura 7-2).

Los sensores HOBO MX2301A son capaces de realizar mediciones de temperatura con una resolución de 0.02 °C en un rango de -40 a 70 °C. Esto con una precisión de  $\pm 0.25$  °C en mediciones de -40 a 0 °C y  $\pm 0.2$  °C de 0 a 70 °C. Las mediciones de humedad relativa poseen una resolución de 0.01% en un rango de 0 a 100% dentro de los -40 a 70 °C. Su precisión es de  $\pm 2.5\%$  para las mediciones registradas entre el 10% a un 90%, por debajo del 10% y por sobre el 90% su precisión es del  $\pm 5\%$ . Además, es posible configurar el sensor para realizar registros de medición en intervalos de tiempo en rangos de 1 segundo hasta 18 horas por registro (HOBO, 2016).



**Figura 7-2: Sensor HOBO para medir la humedad relativa y temperatura (a) y aplicación para control de datos (b)**

Estos fueron instalados a 3 [m] de altura en las seis ubicaciones descritas anteriormente dentro de la comuna de Valdivia, región de los Ríos, Chile (Figura 7-3).



**Figura 7-3: Instalación sensor HOBO en U4**

Todas las mediciones fueron registradas cada 60 minutos (1 hora), durante el mes de agosto del año 2022, tomando en consideración desde el 31 de julio hasta el 31 de agosto (768 horas) de cada una de las ubicaciones, al igual que los datos históricos obtenidos desde AGROMET establecidos cada 60 minutos desde mayo hasta agosto (2952 horas).

### **7.3 Soluciones constructivas**

Las cuatro soluciones constructivas a utilizar en el estudio se presentan en la Figura 7-4, las que son más utilizadas para viviendas de madera en la ciudad de Valdivia. Primeramente, se considera lo entregado por el MINVU en sus Planes de Descontaminación Atmosférica (PDA) (MINVU, 2023). Dichas soluciones constructivas se enmarcan en la Estrategia de Descontaminación Atmosférica de los años 2014-2018 del Ministerio del Medio Ambiente (MMA). De esta fuente se consideraron dos soluciones constructivas presentadas como: “Tabiquería de madera con lana de vidrio, poliestireno expandido y revestimiento tinglado de fibrocemento” (MINVU, 2016b) y “Tabiquería de madera existente con poliestireno expandido y revestimiento tinglado de fibrocemento” (MINVU, 2016a), las cuales se denominarán como M1 y M2 respectivamente para el presente estudio. Además, se analizan las dos soluciones constructivas descritas en el capítulo 6.1, denominados M3 y M4. conformadas por un revestimiento de yeso cartón, lana de vidrio y revestimiento exterior de Smart panel y por un revestimiento de yeso cartón, poliestireno expandido y revestimiento exterior de Siding fibrocemento.

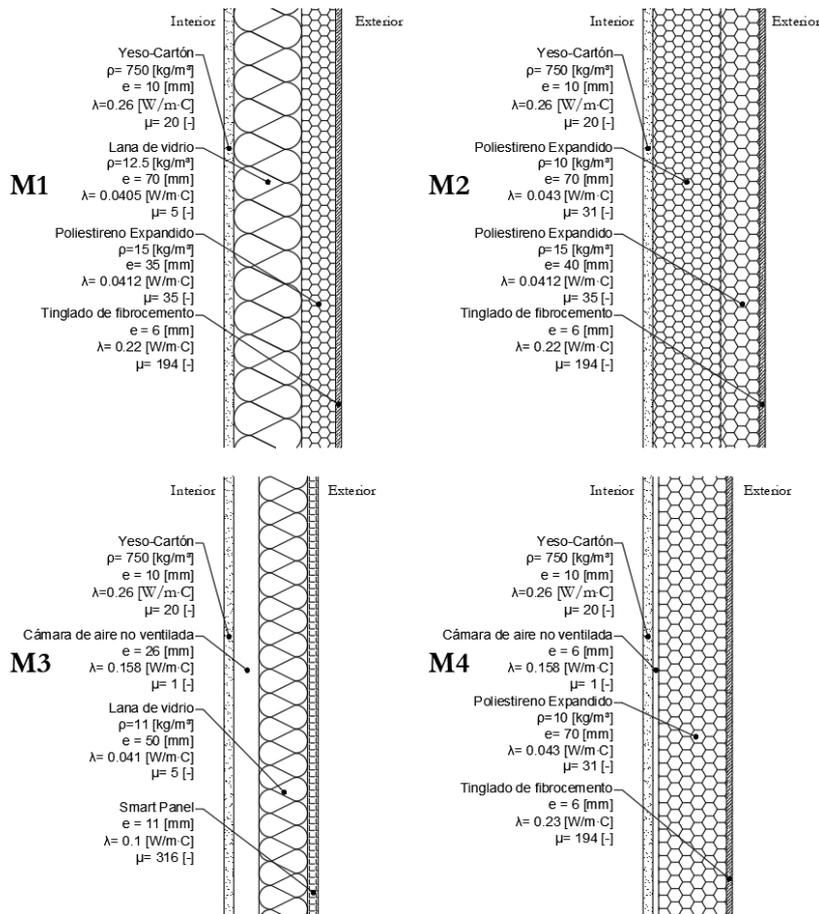


Figura 7-4: Soluciones constructivas bajo estudio:  $\rho$  – densidad;  $e$ - espesor;  $\lambda$ - conductividad térmica y  $\mu$ -factor de resistencia a la difusión de vapor.

## 7.4 Barrera de vapor analizada

Además, en las soluciones constructivas de la zona de estudio se implementará barrera de vapor de polietileno con un espesor de 0.0002 m. La ubicación de este será en la cara interior de la solución (Rodríguez et al., 2012), para un mejor desempeño ante el riesgo de condensación intersticial de los mismos. Las características de este material están presentadas en la Tabla 7-2.

Tabla 7-2: Características generales Barrera de Vapor

Materiales	$e$ [m]	$\lambda n$ [W/m·C]	$R_n$ [m <sup>2</sup> ·C/W]	$\mu$ [-]
B.V. Polietileno	0.0002	0.43	0.0005	151800.00

Luego, la Tabla 7-3 describe las características de resistencia al paso de vapor de agua para la determinación de la ocurrencia de condensación intersticial del material utilizado como barrera de vapor.

**Tabla 7-3: Características de difusión de vapor de Barrera de Vapor**

	<b>Materiales</b>	<b>e</b> [m]	<b>μ</b> [-]	<b>rv</b> [MNs/gm]	<b>Rv</b> [MNs/g]	<b>Sd</b> [m]
<b>B.V.</b>	Polietileno	0.0002	100000*	540540.54	108.11	151800

## 7.5 Métodos de calculo

Se utilizará el método de la norma internacional ISO13788 (INN (Instituto Nacional de Normalización), 2014; ISO, 2014).

### 7.5.1 Cálculo de ocurrencia de condensación intersticial

Primeramente, es requerido el cálculo de las temperaturas en las diversas capas de la solución constructiva, lo cual es posible a partir de:

$$\Delta\theta_n = (\theta_i - \theta_e) \frac{R_n}{R_T} \text{ (Ec. 7-1)}$$

donde:  $\Delta\theta_n$ : Caída de temperatura en la capa  $n$ .  $\theta_i$ : Temperatura interior.  $\theta_e$ : Temperatura exterior.  $R_n$ : Resistencia térmica de la capa  $n$ .  $R_T$ : Resistencia térmica total.

Por lo que para realizar el cálculo es necesario obtener la resistencia térmica ( $R_n$ ) de cada material, la cual es calculada de la siguiente manera:

$$R_n = \frac{e_n}{\lambda_n} \text{ (Ec. 7-2)}$$

donde:  $e_n$ : espesor de cada capa.  $\lambda_n$ : Conductividad térmica de cada capa.

Además, es necesario obtener la resistencia térmica total ( $R_T$ ), de modo que:

$$R_T = \frac{1}{U} = R_{si} + \sum_{n=1}^Z R_n + R_{se} \text{ (Ec. 7-3)}$$

donde:  $R_T$ : Resistencia térmica total.  $\sum_{n=1}^Z R_n$ : Suma de todas las capas componentes de la solución constructiva.  $R_{si}$ : Resistencia térmica de la capa superficial de aire interior.  $R_{se}$ : Resistencia térmica de la capa superficial de aire exterior.  $U$ : Transmitancia térmica.

De acuerdo a la normativa chilena NCh 853.Of2007(INN (Instituto Nacional de Normalización), 2007)., los valores de las resistencias térmicas de las capas superficiales de aire interior ( $R_{si}$ ) y exterior ( $R_{se}$ ), corresponden a 0,12 y 0,05 respectivamente.

Luego, se determinarán las presiones de saturación en la solución constructiva. Estas se pueden obtener directamente a través de las siguientes relaciones del documento técnico Humedad por Condensación en Viviendas Prevención y Soluciones (Rodríguez et al., 2012) y la NCh1973 (INN (Instituto Nacional de Normalización), 2014), correspondientes a la presión de vapor de agua saturada:

$$P_{sat}(\theta) = 610.5 \cdot e^{\frac{17.269 \cdot \theta}{237.3 + \theta}}, \text{ para } \theta \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C (Ec. 7-4)}$$

$$P_{sat}(\theta) = 610.5 \cdot e^{\frac{21.875 \cdot \theta}{265.5 + \theta}}, \text{ para } \theta < 0 \text{ } ^\circ\text{C (Ec. 7-5)}$$

donde:  $P_{sat}(\theta)$ : presión de vapor de saturación a la temperatura  $\theta$ .

Posteriormente, se determinan las presiones parciales de vapor a través del elemento en sus distintas capas. Utilizando la expresión:

$$\Delta P_{vj} = (P_{vi} - P_{ve}) \frac{R_{vj}}{R_{VT}} \text{ (Ec. 7-6)}$$

donde:  $\Delta P_{vj}$ : Caída de presión de vapor de agua en la capa  $j$  del elemento.  $P_{vi}$ : Presión de vapor en la cara interior del elemento, es igual a la presión de vapor interior.  $P_{ve}$ : Presión de vapor en la cara exterior del elemento, es igual a la presión de vapor exterior.  $R_{vj}$ : Resistencia a la difusión de vapor de la capa  $j$ .  $R_{VT}$ : Resistencia a la difusión de vapor total del elemento.

Luego se definieron la permeabilidad al vapor de agua ( $\delta$ ), el cual expresa la cantidad de vapor de agua que se transmite a través de un material. De manera que:

$$\delta = 0.185 \cdot \frac{1}{\mu} \text{ (Ec. 7-7)}$$

Donde:  $\delta$ : Permeabilidad al vapor de agua.  $\mu$ : Factor de resistencia a la difusión de vapor.  $\mu$  es una característica propia de cada material y es definido a partir de la permeabilidad del aire y la del material mismo, donde, el valor de  $\mu_{Air}$  = 1. Además, para valores superiores a 100000 se considerará este valor según lo dicho en la NCh 1973.

De esto se obtiene la resistividad al vapor de agua ( $r_v$ ):

$$r_v = \frac{1}{\delta} \text{ (Ec. 7-8)}$$

Y posteriormente la resistencia a la difusión de vapor ( $R_v$ ) de cada material se obtiene:

$$R_v = \frac{e}{\delta} = r_v \cdot e \text{ (Ec. 7-9)}$$

Donde:  $R_v$ : Resistencia a la difusión de vapor de agua.  $e$ : Espesor del material.

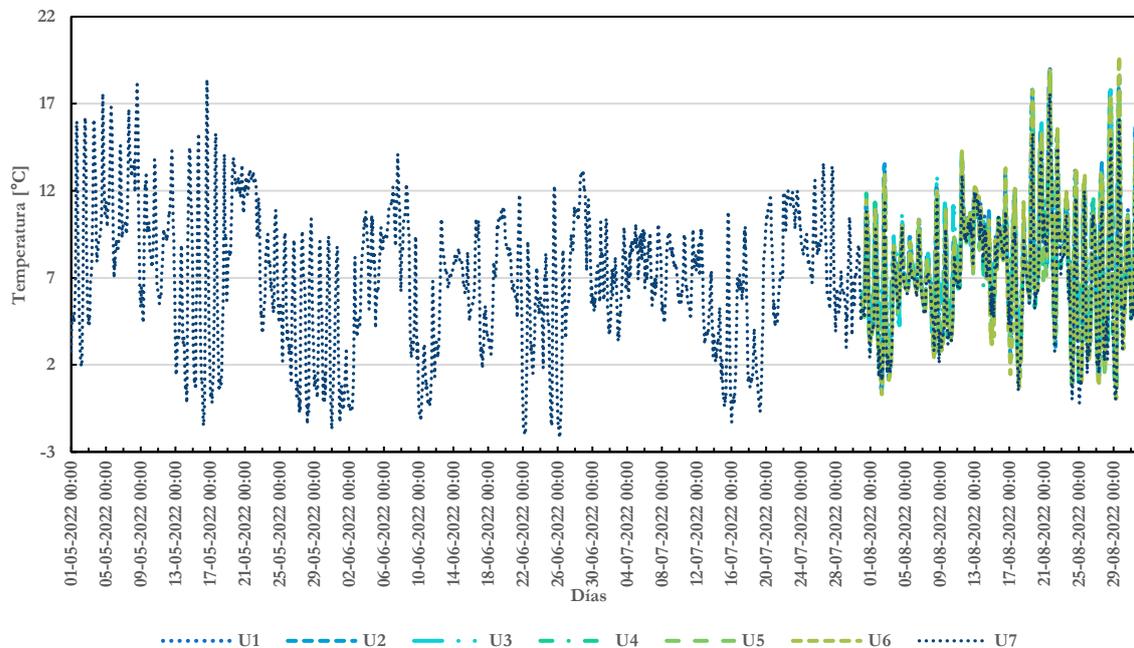
Finalmente, se comparan las presiones parciales de vapor obtenidas, con las presiones de saturación de vapor de agua para determinar el riesgo del sistema constructivo. Aquellos puntos donde la presión parcial supere a la de saturación serán los que presenten riesgo de condensación.

## 7.6 Resultados y discusiones

Los resultados son expuestos en los siguientes puntos principales: (i) Temperatura y humedad relativa obtenidos por las mediciones en las siete ubicaciones durante el mes de agosto y en U7 desde el mes de mayo hasta agosto, (ii) Resultados de desempeño de las soluciones constructivas sin barrera de vapor, (iii) Resultados de desempeño de las soluciones constructivas con barrera de vapor y finalmente (iv) Discusión de la implementación de barrera de vapor tradicional y alternativas.

### 7.6.1 Temperatura y Humedad Relativa

En la Figura 7-5 se presentan los siguientes registros horarios de temperatura y humedad relativa en siete puntos de medición.



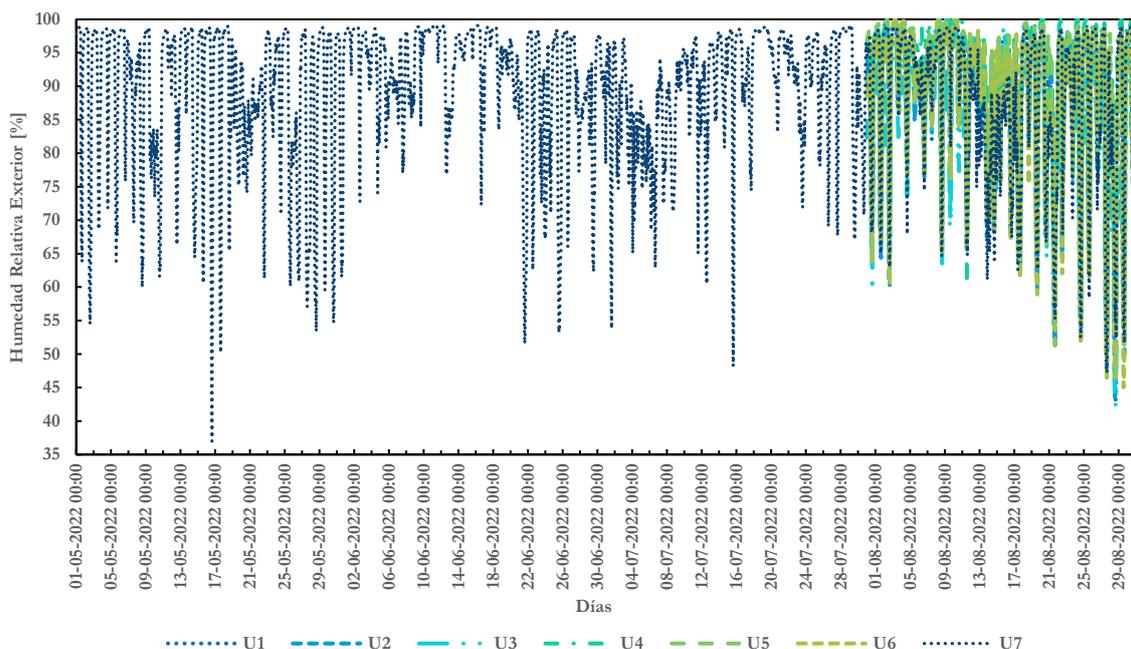


Figura 7-5: Temperatura y Humedad relativa exterior por hora desde mayo hasta agosto

A modo de resumen y referencia se presenta en la Tabla 7-4 el promedio de temperatura y humedad relativa de las siete estaciones durante el mes de agosto del año 2022.

Tabla 7-4: Promedio de temperaturas y humedad relativa mes de agosto 2022

Ubicación	Temperatura [°C]		Humedad Relativa [%]	
	Prom Mensual	St. Dev	Prom Mensual	St. Dev
U1	7.86	3.19	88.40	11.11
U2	7.78	3.43	87.50	11.53
U3	8.24	2.56	85.90	9.88
U4	7.29	3.37	90.84	10.85
U5	7.37	3.24	90.13	10.84
U6	7.56	3.63	87.68	11.73
U7	7.01	3.33	87.32	11.94

Se puede ver en la Tabla 7-4 como U4 y U7 son las ubicaciones con menor temperatura promedio mensual durante agosto de 2022, acorde con lo esperado al presentarse en una ubicación fuera del entorno urbano y sin construcciones cercanas, mientras que U1, U4 y U5 presentan la mayor humedad relativa al tratarse de los puntos más cercanos a cuerpos de agua como lo son el río Valdivia, pequeños riachuelos y un humedal.

Aun con las diferencias presentadas, es posible apreciar que el comportamiento de temperatura y humedad relativa registrados en las siete ubicaciones resulto sin variaciones significativas al ser puntos principalmente perimetrales y no totalmente centrales en el entorno urbano.

### 7.6.2 Resultados soluciones sin Barrera de vapor

#### 7.6.2.1 Porcentaje de condensación intersticial

Con unas condiciones internas de temperatura de 20 °C y una humedad relativa de 50% se obtuvo el porcentaje de horas con la presencia de la condensación intersticial (Figura 7-6) para cada una de las soluciones constructivas en las diferentes ubicaciones geográficas.

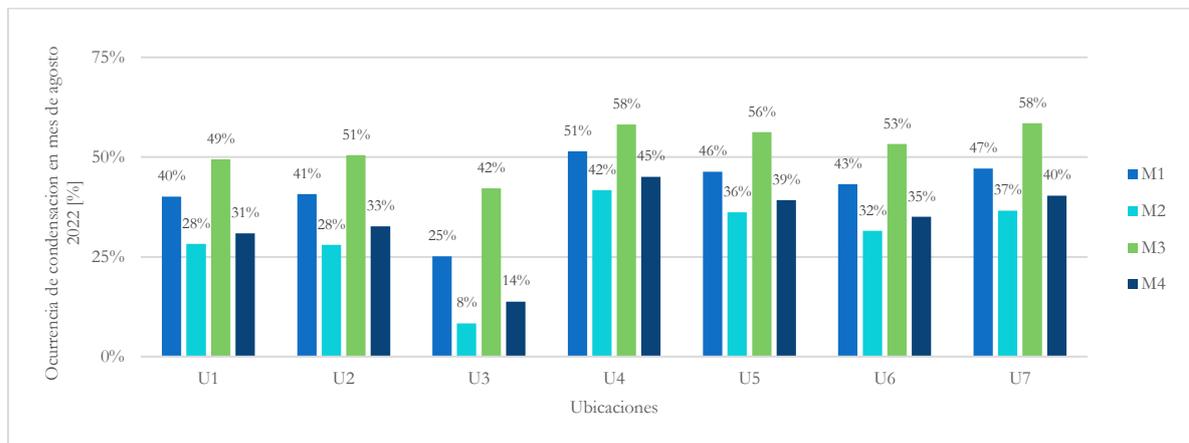
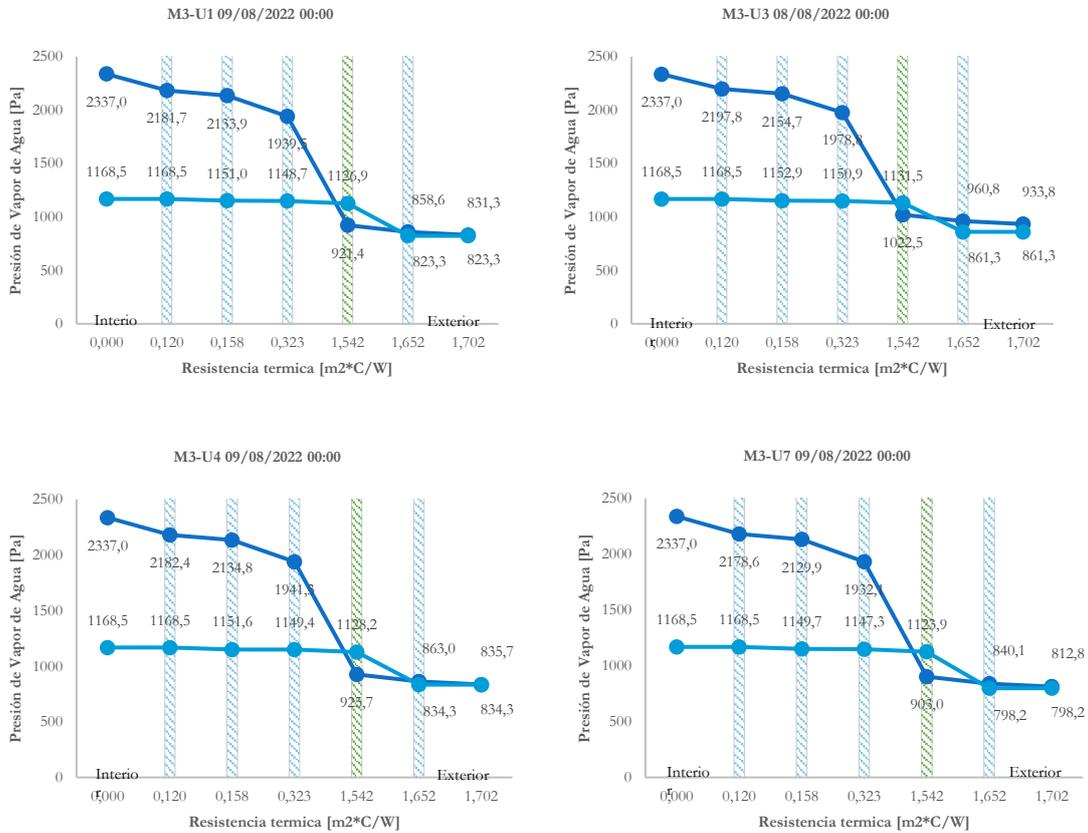


Figura 7-6: Porcentaje de condensación intersticial durante mes de agosto 2022.

Donde se puede ver como en todas las ubicaciones los comportamientos ante la ocurrencia de la condensación intersticial son similares, a excepción de la U3 presente en la costa oceánica donde se presentó el menor efecto al ser la ubicación con mayor temperatura promedio mensual y menor humedad relativa durante el periodo analizado. Por lo demás, la ubicación con mayor porcentaje de horas generando condensación fue la registrada en la U4, un punto muy cercano a un río pequeño en un entorno bastante rural.

Además, el muro con mayor incidencia en el fenómeno en todas las ubicaciones resulto ser M3, obteniendo de un 42% a un 58% de horas en las que se generó condensación intersticial en las diferentes ubicaciones.

De M3 se presentan en la Figura 6-17 el comportamiento ante las condiciones externas las ubicaciones U1, U3, U4 y U7 en el día 9 de agosto a las 00:00 horas, siendo estas ubicaciones escogidas al ser las dos de menor ocurrencia de condensación intersticial, U1 y U3, y las dos de mayor ocurrencia de este, U4 y U7.



**Figura 7-7: Perfil de presión de vapor de agua interior de M3 en U1, U3, U4 y U7 el día 9 de agosto a las 00:00 horas**

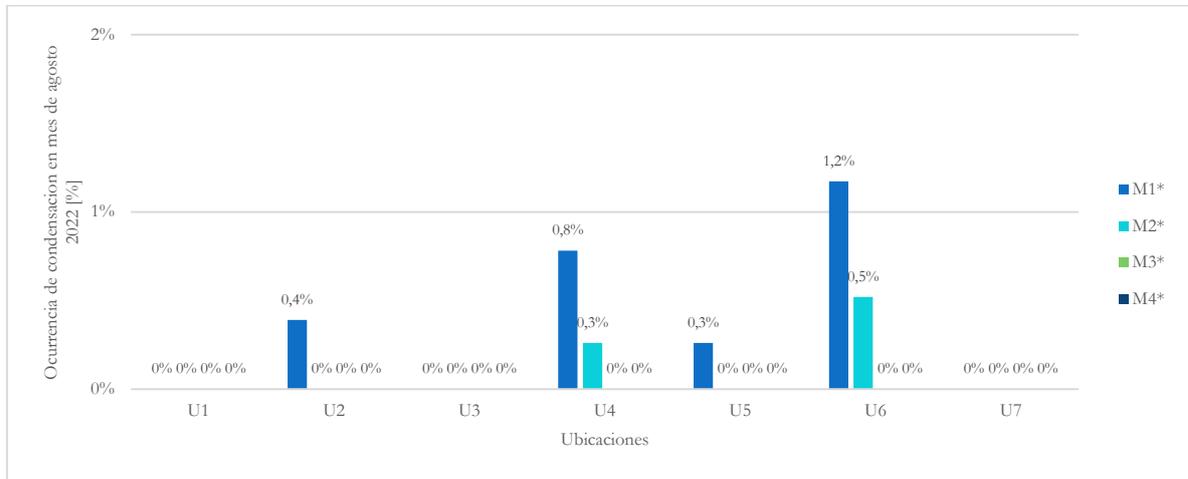
Se puede apreciar como en la interfaz descrita entre el límite exterior del material aislante y la cubierta externa presenta una mayor presión interna que la presión de saturación en la interfaz, generando de esta manera condensación intersticial en dicha hora.

Además, es posible ver cómo, aunque en las cuatro ubicaciones se presenta condensación para esta hora en particular, la menor diferencia de presiones se encuentra en U3, donde tanto la temperatura fue mayor como la humedad relativa exterior menor para dicha hora en comparación con el resto de las ubicaciones.

### 7.6.3 Resultados soluciones con Barrera de Vapor

#### 7.6.3.1 Porcentaje de condensación intersticial

A continuación, se describe el comportamiento para los muros modificados con una barrera de vapor de polietileno de 0.0002 [m], con unas condiciones internas de temperatura de 20 °C y una humedad relativa de 50%, para las diferentes ubicaciones.



**Figura 7-8: Porcentaje de condensación intersticial durante mes de agosto 2022 con barrera de vapor**

Es notable el efecto de dicho material de barrera de vapor en todas las ubicaciones, disminuyendo la ocurrencia de condensación intersticial a niveles mínimos en las diferentes soluciones constructivas (Figura 7-8).

#### 7.6.4 Discusión implementación Barreras de Vapor y alternativas

##### 7.6.4.1 Barrera de Vapor hipotética y propuesta

En vista del gran impacto medioambiental que presenta el polietileno en la construcción, principalmente al no tener capacidad de reutilización, lenta degradación y solo generar más desechos para el ambiente y considerando el excelente desempeño de una barrera de vapor en la disminución de condensación intersticial registrada, se propone determinar una barrera de vapor hipotética, con la finalidad de definir los límites objetivos necesarios que debe presentar un material para lograr un buen comportamiento ante la condensación intersticial de las soluciones constructivas en la zona de estudio.

Como barrera de vapor hipotética se establece un espesor límite de 0.001 m, aceptable dentro del sistema constructivo, y se busca asignar un valor objetivo para el factor de resistencia a la difusión de vapor ( $\mu$ ), para posteriormente proponer materiales menos contaminantes capaces de cumplir el valor  $\mu$  solicitado.

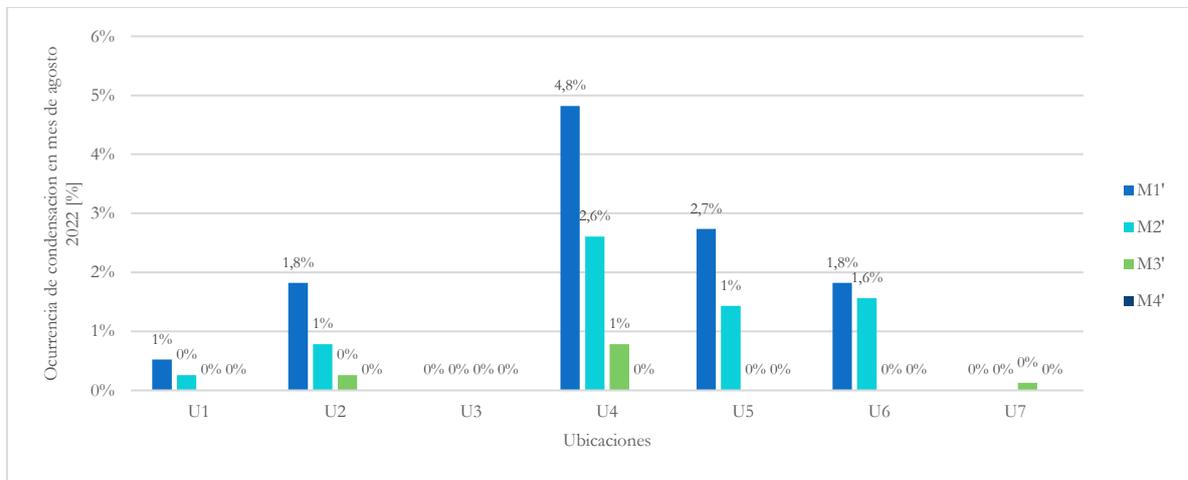
El material de polietileno utilizado con anterioridad, con su espesor y factor de resistencia a la difusión de vapor, presentaba un espesor de capa de aire equivalente ( $s_d$ ) de 20 m, por lo que para el material objetivo se solicitara una  $s_d = 16$  m inicialmente.

Considerando lo anterior, esta barrera de vapor tendrá las características presentadas en la Tabla 7-4. Resultando en los parámetros de resistencia a la difusión de vapor presentados en la Tabla 7-5 fueron calculados de acuerdo con la Ec. 7:7-9.

**Tabla 7-5: Características difusión de vapor Barrera de Vapor hipotética**

	<b>Materiales</b>	<b>e</b> [m]	<b><math>\mu</math></b> [-]	<b>rv</b> [MNs/gm]	<b>Rv</b> [MNs/g]	<b>Sd</b> [m]
<b>B.V.</b>	Hipotética	0.001	16000	86486.49	86.49	16.00

Con este material hipotético, el desempeño durante el mes de agosto 2022 ante la condensación intersticial fue el presentado en la Figura 7-9. Donde se nota que, para cada solución constructiva del mes, la formación de la condensación intersticial es menor de 5% de horas del mes.



**Figura 7-9: Porcentaje de condensación intersticial durante mes de agosto 2022 con 50% de humedad relativa interna y barrera de vapor hipotética**

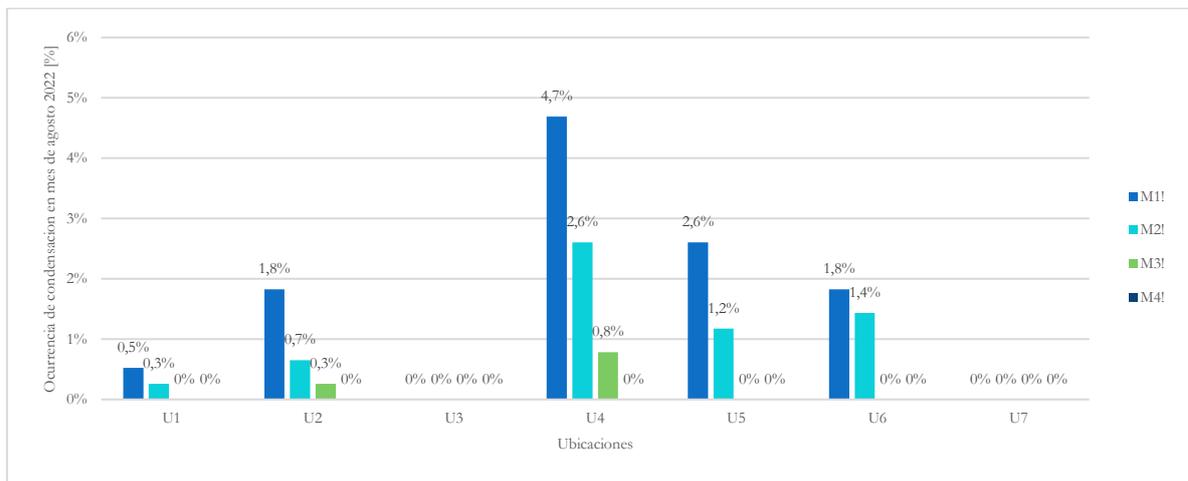
De lo anterior se presenta como propuesta la utilización de Papel Kraft con un espesor de 0.0007 m, donde sus características propias en aspecto de resistencia de la difusión de vapor del agua son descritas en las Tabla 7-6.

**Tabla 7-6: Características difusión de vapor Barrera de Vapor Papel Kraft**

	<b>Materiales</b>	<b>e</b> <b>[m]</b>	<b><math>\mu</math></b> <b>[-]</b>	<b>rv</b> <b>[MNs/gm]</b>	<b>Rv</b> <b>[MNs/g]</b>	<b>Sd</b> <b>[m]</b>
<b>B.V.</b>	Papel Kraft	0.0007	23012	124389.19	87.072	16.108

De aquí se puede apreciar como con el espesor analizado, correspondiente a dos hojas comerciales de espesor 0.00035 m, es posible superar el límite inferior propuesto de  $s_d = 16$  m.

Considerando 20 °C de temperatura y 50% de humedad relativa interior, ante las condiciones externas obtenidas para las siete ubicaciones medidas durante el mes de agosto de 2022. Se presenta en la Figura 7-10 el desempeño obtenido ante la incidencia de generar condensación intersticial.



**Figura 7-10: Porcentaje de condensación intersticial durante mes de agosto 2022 con 50% de humedad relativa interna y barrera de vapor Papel Kraft**

Es posible apreciar como el desempeño de este es ligeramente mejor que el presentado en el apartado hipotético, y como en la peor de las condiciones el fenómeno solo se generó un 4.7% del tiempo, lo cual es equivalente a 36 horas de 768 analizadas.

En vista de lo presentado, una posible barrera de vapor para las condiciones analizadas es la aplicación de Papel Kraft con un espesor mínimo de 0.0007 m, obteniendo resultados satisfactorios en su desempeño en vista de su resistencia a la difusión de vapor. De esta forma se obtendrían los beneficios de utilizar un material con una carga ambiental mucho menor que la del polietileno y un desempeño similar.

Este capítulo realiza un análisis del comportamiento de soluciones constructivas de muros de viviendas de Valdivia cuyo material principal es la madera, cercanas a masas de agua que puedan generar condensación intersticial. Una alta humedad relativa en el ambiente conduce a la condensación de humedad al interior de muros de edificaciones, afectando la durabilidad de los materiales. Se analiza la normativa chilena, que no incorpora el estudio del comportamiento de las soluciones constructivas dentro de una misma zona geográfica, aun cuando están cercanas a grandes masas de agua. Se registraron los datos de temperatura y humedad relativa exterior en siete ubicaciones diferentes durante el mes de agosto, analizando el comportamiento de cuatro soluciones constructivas ante estas condiciones exteriores. Se compara el desempeño inicial de una barrera de vapor convencional y otra propuesta frente a los cambios de la humedad relativa interior. Los resultados muestran que las soluciones constructivas generan condensación intersticial, siendo un factor determinante la humedad relativa interior, al implementar una barrera de vapor convencional el fenómeno se redujo drásticamente. Además, se propone Papel Kraft como material alternativo de menor impacto ambiental capaz de cumplir con parámetros límite de resistencia a la difusión de vapor con desempeño aceptable.

## Capítulo 8. Conclusiones y Recomendaciones

En esta investigación se han modelado diferentes escenarios climáticos presentes y futuros, analizando variaciones en los forzamientos biogeoquímicos. Esto permitió proyectar cambios en los usos de suelo alrededor de la ciudad de Valdivia que a su vez generarán variaciones en el entorno urbano que afectarán a las futuras viviendas, entregándose recomendaciones en los procesos constructivos y materialidad para mejorar el confort habitacional.

A continuación, se detallan las principales conclusiones en cada uno de los tópicos abordados en los capítulos que componen esta tesis:

**Revisión y hallazgos sobre el área de estudio**, en este capítulo se contribuyó a entender mejor las relaciones entre la circulación y la distribución sedimentos y partículas en el Estuario del Río Valdivia bajo diferentes condiciones ambientales.

Se establecieron que las condiciones ambientales características (regímenes) del Estuario del Río Valdivia se clasificaron en Normal, Extremo, Excepcionalmente Lluvioso y Seco, a partir del análisis de la información hidrográfica y meteorológica. Los regímenes están controlados principalmente por la geometría del estuario, en particular por las variaciones de ancho y profundidad, el flujo de agua dulce y la producción de turbulencia en la columna de agua por las mareas y el viento. Las estructuras generales de la columna de agua esperadas para los cuatro regímenes son parcialmente mezclada, fuertemente estratificada, cuña salina y bien mezclada, respectivamente.

**Análisis bibliométrico sobre el estado del conocimiento**, en este estudio examinó la evolución del conocimiento relacionado con land use management in coastal cities (LUM-CC), mostrando 1.386 artículos buscados en la plataforma WoS desde 1987 hasta 2020. El análisis de resultados identificó las principales áreas temáticas, los autores más citados y los países en los que se llevó a cabo la mayor parte de la investigación relacionada con LUM-CC. Esto condujo a los hallazgos más significativos de este capítulo, que se presentan a continuación:

En general, el análisis de los trabajos publicados sobre LUM-CC muestra que el riesgo de inundación debido a la subida del nivel medio del mar es un tema dominante en

todos los periodos de tiempo y tipos de costa. Esto se refleja en la evolución de las palabras clave predominantes en la literatura científica analizada en 4 periodos de tiempo, ya que pasa de "Uso del suelo" a "Inundaciones", luego la evolución de "Ciudades costeras", a "Factor de riesgo", y termina en el último periodo con el concepto de "Vulnerabilidad". Se refleja en los primeros años de investigación, cuando se refería a la lucha contra el cambio climático, luego al desarrollo de medidas de mitigación, y hoy a la creación de adaptabilidad ante nuevos escenarios climáticos.

Esto afectará directamente a nuestra forma de hacer urbanismo costero porque pone de manifiesto la necesidad de explorar modelos proactivos de adaptación a esta nueva realidad climática que sean más eficaces para reducir las inundaciones a más largo plazo, teniendo en cuenta factores técnicos, administrativos, económicos y sociales.

Además del cambio climático, la acción humana cataliza la pérdida de estos ecosistemas, generando problemas ambientales, económicos y sociales, lo que, unido a las condiciones morfológicas locales, hace que el estudio de estuarios y humedales se convierta en un área importante de investigación relacionada con el LUM-CC.

La gestión del riesgo de inundaciones costeras cerca de los humedales, que sólo recientemente ha pasado a un primer plano en los últimos esfuerzos de investigación, requiere un enfoque multiescala que exige estrategias que sean viables tanto económica como socialmente, incluyendo la incertidumbre de las condiciones climáticas futuras y los fenómenos extremos.

**Efectos del cambio en el nivel medio del mar y sismológicos**, una vez empleado el modelo matemático para simular las elevaciones de equilibrio de un humedal en Valdivia, es posible proyectar el comportamiento de la altura del humedal hacia 2100. Demostrándose, que los terremotos son una variable que no se puede despreciar en la zona de estudio, debido a su historial de eventos sísmicos y la importancia directa sobre z.

El modelo estadístico de Montecarlo, para la proyección de eventos sísmicos y su relación con las subsidencias que provocan en el terreno, se calibró de manera correcta, entregando valores coherentes y en sintonía con los estudios sismológicos realizados en la zona de estudio y los escenarios IPCC de cambio climático utilizados en este trabajo, generando una variable de cambios del terreno en el tiempo, complementando el trabajo de D'Alpaos et al., 2011. Hay que remarcar, que es

necesario realizar múltiples simulaciones del modelo, para generar un alto grado de certidumbre y establecer un intervalo de confianza de los resultados.

Las variaciones en la tasa de aumento relativo del nivel del mar (R) afectan directamente a la altura de equilibrio a la que se encuentra sujeto el humedal, por lo que fue posible observar que mientras mayor sea la tasa de aumento relativo del nivel del mar, son menores las alturas de equilibrio, con una tendencia hacia el ahogo de los humedales. Dicha altura de equilibrio disminuye a medida que aumenta el valor de R. Los resultados indican que el humedal del Río Cruces tiene una alta resiliencia frente a estos cambios del NMM.

Los terremotos, pueden generar hundimientos en el suelo, produciendo cambios directos en la altura del humedal, alterando su equilibrio, provocando alturas finales menores a las esperadas frente al nivel medio del mar. Cabe señalar, que estos cambios en el terreno dependerán netamente de la magnitud y periodicidad con que se genere el terremoto, como se ha observado en este estudio la generación de eventos sísmicos a un universo temporal de 100 años, es relativamente baja, y en su mayoría son sismos de menor intensidad, lo que genera menores subsidencia, por lo que esta variable probablemente no sería tan catastrófica en este periodo de tiempo, pero no puede ser descartada.

**Cambios en usos de suelo frente variaciones en NMM y sismos,** se evidencia que las categorías más sensibles a cambios son las marismas. Estas son los principales usos en modificar sus áreas ya sea en reducciones, expansiones o su carácter, es decir, cambian de irregularmente inundadas a regularmente inundadas y colonizan nuevas áreas.

Los cambios en las zonas inundables ante el aumento del nivel del mar para los años analizados no sugieren modificaciones a las disposiciones del actual plan regulador, dado que aquellas zonas que presentan los principales cambios ya están catalogadas como zonas de riesgo de inundación.

Dado que el aumento del nivel del mar local genera cambios menores en las zonas inundables de la costa del área de estudio, la pérdida de los servicios ecosistémicos que estas zonas ofrecen, tales como buffer ante inundaciones, secuestro de carbono, colaboración en el ciclo de los nutrientes, vida silvestre, etc., queda supeditado a la

acción sísmica la cual puede provocar un cambio significativo de relieve, algún otro evento climático o principalmente a la acción humana.

Con respecto a la acción sísmica se pudo observar que un sismo de magnitud 9,5 Mw genera cambios significativos en la zona seleccionada (Las Mulatas), mientras que un sismo de magnitud 6,9 Mw no genera cambios significativos.

Debido a que la dinámica del suelo es compleja, los efectos de los sismos de 6,9 Mw y 9,5 Mw en el nivel deben considerarse como una subsidencia promedio. En cuanto al efecto del sismo de 9,5 Mw sobre el camino a la barcaza del sector Las Mulatas, se sugiere generar estudios en dichas zonas para implementar estrategias de protección de la vía o considerar planes alternativos frente a tal posibilidad.

Con base en lo anterior, y considerando la tendencia presente de construcción en altura en sectores rivereños, se hace énfasis en la protección de estas zonas inundables frente a las diversas acciones antropogénicas, para conservar los beneficios mencionados. La Política Nacional de Desarrollo Urbano, establece que los Instrumentos de Planificación Territorial deben considerar los sistemas naturales y su capacidad de carga, propendiendo a un crecimiento de las urbes sustentable lo cual debe ser entendido como una Política de Estado. En concordancia, Ramos-Reyes et al., (2021) sugieren que las tendencias del cambio de uso de suelo pueden ser mitigadas poniendo en marcha políticas de desarrollo sostenible, incorporando medidas de planificación de corto y mediano plazo para la creación de programas de Ordenamiento Territorial y Áreas Naturales Protegidas.

En próximas investigaciones es deseable contar con un archivo DEM de mayor precisión en toda el área de estudio, esto permitirá discriminar si aumentar la precisión en los datos genera cambios relevantes en los resultados.

Cabe mencionar, que a la fecha de desarrollo de este documento (diciembre 2022) la Ilustre Municipalidad de Valdivia ha comenzado las acciones pertinentes para desarrollar un nuevo Plan Regulador Comunal.

**Procesos constructivos frente a peligro de inundaciones**, el cambio climático está aumentando la frecuencia e intensidad de las inundaciones, lo que las convierte en una amenaza más común y grave para los sistemas humanos y naturales. Hay varias formas de hacer que las casas sean más resistentes a las inundaciones, como elevar la altura de la vivienda, utilizar materiales resistentes al agua e instalar un sistema de

drenaje. Además, las casas anfibia y de pilotes son dos tipos de viviendas resistentes a las inundaciones cada vez más populares.

Las casas anfibia son una solución prometedora a las inundaciones, debido a que son muy móviles, duraderas y eficientes energéticamente, y pueden fabricarse con materiales sostenibles. Los retos asociados a su construcción son el coste de adquisición y mantenimiento, y la disponibilidad de lugares adecuados. Sin embargo, es probable que estos retos se superen a medida que la tecnología siga desarrollándose.

En cuanto a las casas sobre pilotes, son más comunes en el sur de Chile, a la hora de diseñarlas, es importante considerar varios factores, como el tipo de suelo, la altura del nivel freático, las cargas de viento y sísmicas, y los materiales que se utilizarán. En Chile existe un marco normativo establecido por la norma NCh433.Of96 para garantizar la seguridad y resistencia de estas estructuras ante eventos sísmicos.

El gobierno de Chile está considerando la posibilidad de elaborar una normativa para la construcción de casas anfibia, y puede aprender de las experiencias de otros países como Holanda y Estados Unidos. Sin embargo, existen desafíos específicos que deben abordarse, como la actividad sísmica en Chile, la disponibilidad de terrenos adecuados y el costo de construcción. Estos factores deben ser considerados cuidadosamente para desarrollar una normativa efectiva para las casas anfibia en Chile.

El diseño y construcción de casas anfibia requiere de una planificación cuidadosa y consideración de varios factores, como la presión que ejerce el peso de la estructura sobre el agua y la profundidad de los cimientos necesarios para mantener la estabilidad. Además, se deben encontrar soluciones para proporcionar servicios públicos a estas casas de manera efectiva. En el caso de las casas se encuentre flotando y sujetas a postes guía verticales, estos ayudarán a mantener la casa en posición vertical, incluso cuando esté parcialmente sumergida.

Además del diseño de la casa, también es importante contar con estrategias de protección del usuario en caso de inundación. Esto incluye disponer de un plan de respuesta de emergencia inmediata, así como proporcionar alojamiento temporal y otro tipo de asistencia a las personas desplazadas por una inundación.

**Control interior de humedad en viviendas cercanas a zonas costeras,** durante este capítulo, se observó que independiente de la ubicación analizada en la ciudad de Valdivia existe una variación muy baja de temperatura y humedad relativa, siendo los principales factores determinantes para su aumento o disminución la cantidad de construcciones cercanas para la variación de temperatura y la cercanía a grandes masas de agua para la variación de la humedad relativa registrada. De esta manera, una ubicación emplazada fuera del entorno urbano y en cercanía con grandes masas de agua como ríos o humedales, presentara una menor temperatura y una mayor humedad relativa.

Las cuatro soluciones constructivas analizadas presentaron un desempeño desfavorable, generando una peligrosa cantidad de condensación a lo largo de los periodos analizados independientemente de la ubicación en la que se encuentren. Obteniendo en el análisis, periodos de tiempo prolongados en los que las diversas soluciones constructivas se encontraron con agua en estado líquido en su interior.

De las cuatro soluciones constructivas, las más alarmantes resultaron ser M1 y M3, siendo esta última incapaz de secarse en el periodo analizado para cuatro de las ubicaciones, además de que considerando que con un pequeño aumento de la humedad interior de las viviendas ambas soluciones no serían capaces de secarse en ninguna de las ubicaciones.

Una barrera de vapor, instalada en la cara interior de la solución constructiva, presenta un desempeño totalmente favorable, disminuyendo drásticamente la incidencia del fenómeno en todas las ubicaciones analizadas.

Al ser el polietileno el material mayormente utilizado como barrera de vapor y presentar un impacto medioambiental tan desfavorable, es posible proponer la implementación de un material no convencional que asuma el rol de barrera de vapor. El Papel Kraft obtuvo un desempeño favorable en el análisis preliminar para su implementación como barrera de vapor considerando su factor de difusión de vapor y la disponibilidad de este, siendo requeridas investigaciones sobre su implementación y durabilidad como material aislante en función de barrera de vapor.

Finalmente, es relevante enfatizar que investigaciones futuras sobre diversos materiales capaces de actuar como barrera de vapor sin tener una carga ambiental tan elevada y, favorecerán a prolongar la durabilidad de los materiales aislantes y favorecer el desempeño energético de las viviendas.

## **Recomendaciones para futuras investigaciones.**

**El impacto del cambio climático sobre los humedales.** Para futuras investigaciones podrían considerarse algunos aspectos, como el impacto del cambio climático en la biodiversidad de los humedales del sur de Chile y/o los costes económicos de la pérdida de humedales debido tanto al relleno de estos, como aspectos estéticos que afecten al turismo.

**El desarrollo de estrategias sostenibles de gestión de inundaciones.** Se hace indispensable la necesidad de estrategias sostenibles de gestión de inundaciones en Chile, teniendo en cuenta los desafíos planteados por el cambio climático y la actividad sísmica propia del país. Las investigaciones a futuro podrían centrarse en el desarrollo de estrategias específicas para la implementación de soluciones habitacionales resilientes como el uso de casas anfibia o la construcción de diques.

**El papel de los humedales en la gestión del riesgo de inundaciones costeras.** En investigaciones futuras, se podría estudiar la utilización de los humedales como barreras naturales de mitigación de los impactos de las inundaciones, por ejemplo, absorbiendo el exceso de agua o proporcionando un amortiguador contra las mareas de tormenta.

**El desarrollo de nuevas tecnologías para viviendas resistentes a las inundaciones.** Los esfuerzos de estudios futuros se deberán centrar en el desarrollo de nuevas tecnologías de materias e infraestructura, aún más eficaces para proteger las viviendas de las inundaciones, así como casas o viviendas desmontables y de reestructuración rápida.

Además de en cuanto a las **tecnologías de ventilación**, las investigaciones futuras podrían centrarse en el estudio de los efectos de los distintos materiales de construcción en la condensación, como el tipo de aislamiento utilizado, el grosor de las paredes y el tipo de material de cubierta, fomentando el desarrollo de nuevas barreras de vapor fabricadas con materiales más sostenibles, como el papel kraft.

## Bibliografía.

- Abadie, L. M., Jackson, L. P., Sainz de Murieta, E., Jevrejeva, S., & Galarraga, I. (2020). Comparing urban coastal flood risk in 136 cities under two alternative sea-level projections: RCP 8.5 and an expert opinion-based high-end scenario. *Ocean & Coastal Management*, 193, 105249. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105249>
- Abdullah, A., Masrur, A., Adnan, M. S. G., Baky, A., Hassan, Q., & Dewan, A. (2019). Spatio-temporal Patterns of Land Use/Land Cover Change in the Heterogeneous Coastal Region of Bangladesh between 1990 and 2017. *Remote Sensing*, 11. <https://doi.org/10.3390/rs11070790>
- Able, K. (2005). A re-examination of fish estuarine dependence: Evidence for connectivity between estuarine and ocean habitats. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 64, 5–17. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2005.02.002>
- Aerts, J. C. J. H., Botzen, W. J. W., Emanuel, K., Lin, N., de Moel, H., & Michel-Kerjan, E. O. (2014). Evaluating Flood Resilience Strategies for Coastal Megacities. *Science*, 344(6183), 473–475. <https://doi.org/10.1126/science.1248222>
- Agromet. (2023). *Informe de temperaturas de la Red Agroclimática Nacional*. <https://www.agromet.cl/>
- Aguado, A. (2013). *Determinación numérica de la influencia de las condiciones de borde costeras sobre la longitud de una cuña salina en estuarios. Aplicación a estuarios chilenos (1era ed.)*. Universidad de Chile.
- Akasaka, M., Takamura, N., Mitsunashi, H., & Kadono, Y. (2009). Effects of land use on aquatic macrophyte diversity and water quality of ponds. *Freshwater Biology*, 55, 909–922. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02334.x>
- Alonso, S., Cabrerizo, F. J., Herrera-Viedma, E., & Herrera, F. (2009). h-Index: A review focused in its variants, computation and standardization for different scientific fields. *Journal of Informetrics*, 3(4), 273–289. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.joi.2009.04.001>
- Alvarado, D., Valdebenito, G., & Burgos, M. (2019). EVALUACION DE CARACTERISTICAS DINAMICAS DE LOS SUELOS DE VALDIVIA EMPLEANDO METODOS SISMICOS DE PROSPECCION GEOFISICA. *Congreso Chileno de Sinmología e Ingeniería Sísmica*, 9.
- Alvarez, M., Fischer, T., De la Llera, J. C., & Ridell, R. (2002). Un modelo integrado para el análisis del riesgo sísmico en edificios. *Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica*, 8.
- American Society of Civil Engineers. (2014). *Flood Resistant Design and Construction*. American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784413791>
- Arnell, N. W., & Gosling, S. N. (2016). The impacts of climate change on river flood risk at the global scale. *Climatic Change*, 134(3), 387–401. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1084-5>
- Astráлага, M. (2006). *La Convención Ramsar y los ecosistemas de Manglar*. 1–6.
- Astroza, M., Moya, R., & Sanhueza, S. (2002). *ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS EFECTOS DE LOS TERREMOTOS DE CHILLAN DE 1939 Y DE TALCA DE 1928*.
- Bahadur, A., & Tanner, T. (2014). Transformational resilience thinking: putting people, power and politics at the heart of urban climate resilience. *Environment and Urbanization*, 26(1), 200–214. <https://doi.org/10.1177/0956247814522154>
- Balica, S., Wright, N., & Meulen, F. (2012). A flood vulnerability index for coastal cities and its use in assessing climate change impacts. *Natural Hazards*, 64.
- Balogun, A.-L., Yekeen, S. T., Pradhan, B., & Althuwaynee, O. F. (2020). Spatio-Temporal Analysis of Oil Spill Impact and Recovery Pattern of Coastal Vegetation and Wetland Using Multispectral Satellite Landsat 8-OLI Imagery and Machine Learning Models. In *Remote Sensing* (Vol. 12, Issue 7). <https://doi.org/10.3390/rs12071225>
- Baranes, H., Woodruff, J., Talke, S. A., Kopp, R., Ray, R., & DeConto, R. (2020). *Tidally-driven interannual variation in extreme sea level probabilities in the Gulf of Maine*. <https://doi.org/10.1002/essoar.10502881.1>
- Barragan, J. M., & de Andres, M. (2016). Urban expansion in the coastal areas of Latin America and

- Caribbean. *REVISTA DE GEOGRAFIA NORTE GRANDE*, 64, 129–149.  
<https://doi.org/10.4067/S0718-34022016000200009>
- Barragán, J. M., & de Andrés, M. (2015). Analysis and trends of the world's coastal cities and agglomerations. *Ocean & Coastal Management*, 114, 11–20.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.06.004>
- Barrientos, S. (1980). *Regionalización sísmica de Chile*. Universidad de Chile.
- Barrientos, S. (2010). Terremoto (M=8.8) del 27 de febrero de 2010 en Chile. *Revista de La Asociación Geológica Argentina*, 67, 412–420.
- Bellia, L., & Minichiello, F. (2003). A simple evaluator of building envelope moisture condensation according to an European Standard. *Building and Environment*, 38(3), 457–468.  
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(02\)00060-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00060-4)
- Bilskie, M. V., Hagen, S. C., Medeiros, S. C., & Passeri, D. L. (2014). Dynamics of sea level rise and coastal flooding on a changing landscape. *Geophysical Research Letters*, 41(3), 927–934.  
<https://doi.org/10.1002/2013GL058759>
- Blanco, J. A. (2019). *Suitability of Totorá (Schoenoplectus californicus (C. A. Mey.) Soják) for Its Use in Constructed Wetlands in Areas Polluted with Heavy Metals*. 1–22.  
<https://doi.org/10.3390/su11010019>
- Borquez, M., & Cardenas, N. (2022). *TIPOLOGÍA DE LA VIVIENDA EN LA REGIÓN DE LOS RÍOS*. Universidad Austral de Chile.
- Borsddorf, A., Sánchez, R., & Marchant, C. (2009). Las ciudades intermedias aletargadas del sistema urbano chileno y la oportunidad de un desarrollo sustentable: el caso de la ciudad de Valdivia (Chile). In *Ciudades medias o intermedias en un mundo globalizado: As cidades médias ou intermediárias em um mundo globalizado*. Edicions de la Universitat de Lleida.  
<http://digital.casalini.it/9788484093527>
- Buerkert, A., Ganeshiah, K. N., & Siebert, S. (2021). WATER USE IN HUMAN CIVILIZATIONS: AN INTERDISCIPLINARY ANALYSIS OF A PERPETUAL SOCIAL-ECOLOGICAL CHALLENGE. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 8(4), 512–524. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2021393>
- Cabrerizo, F. J., Alonso, S., Herrera-Viedma, E., & Herrera, F. (2010). q2-Index: Quantitative and qualitative evaluation based on the number and impact of papers in the Hirsch core. *Journal of Informetrics*, 4(1), 23–28. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.joi.2009.06.005>
- Carpio, M., González, Á., González, M., & Verichev, K. (2020). Influence of pavements on the urban heat island phenomenon: A scientific evolution analysis. *Energy and Buildings*, 226, 110379.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110379>
- Casado-Aranda, L.-A., Sánchez-Fernández, J., & Viedma-del-Jesús, M. I. (2021). Analysis of the scientific production of the effect of COVID-19 on the environment: A bibliometric study. *Environmental Research*, 193, 110416. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110416>
- Chan, F., Chuah, J., Ziegler, A., Dąbrowski, M., & Olli, V. (2018). Towards resilient flood risk management for Asian coastal cities: Lessons learned from Hong Kong and Singapore. *Journal of Cleaner Production*, 187, 576–589. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.217>
- Chang, H., Pallathadka, A., Sauer, J., Grimm, N. B., Zimmerman, R., Cheng, C., Iwaniec, D. M., Kim, Y., Lloyd, R., McPhearson, T., Rosenzweig, B., Troxler, T., Welty, C., Brenner, R., & Herreros-Cantis, P. (2021). Assessment of urban flood vulnerability using the social-ecological-technological systems framework in six US cities. *Sustainable Cities and Society*, 68, 102786.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102786>
- Chanson, H., & Brown, R. (2018). Stability of individuals during urban inundations: what should we learn from field observations? *Geosciences*, 8(9), 341.
- Chapman, M. G., & Underwood, A. J. (2011). Evaluation of ecological engineering of “armoured” shorelines to improve their value as habitat. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 400(1–2), 302–313. <https://doi.org/10.1016/J.JEMBE.2011.02.025>
- Cheng, H. Q., Chen, J. Y., Chen, Z. J., Ruan, R. L., Xu, G. Q., Zeng, G., Zhu, J. R., Dai, Z. J., Chen, X. Y.,

- Gu, S. H., Zhang, X. L., & Wang, H. M. (2018). Mapping Sea Level Rise Behavior in an Estuarine Delta System: A Case Study along the Shanghai Coast. *Engineering*, 4(1), 156–163. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.02.002>
- Ciampa, F., Seifollahi-Aghmiuni, S., Kalantari, Z., & Ferreira, C. S. S. (2021). Flood mitigation in mediterranean coastal regions: Problems, solutions, and stakeholder involvement. *Sustainability (Switzerland)*, 13(18). <https://doi.org/10.3390/su131810474>
- Cobo, M. J., Martínez, M. A., Gutiérrez-Salcedo, M., Fujita, H., & Herrera-Viedma, E. (2015). 25years at Knowledge-Based Systems: A bibliometric analysis. *Knowledge-Based Systems*, 80, 3–13. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.knosys.2014.12.035>
- Cobo, M., López-Herrera, A. G., Herrera-Viedma, E., & Herrera, F. (2011). An approach for detecting, quantifying, and visualizing the evolution of a research field: A practical application to the Fuzzy Sets Theory field. *J. Informetrics*, 5, 146–166. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2010.10.002>
- Cobo, M., López-Herrera, A. G., Herrera-Viedma, E., & Herrera, F. (2012). SciMAT: A new science mapping analysis software tool. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 63, 1609–1630. <https://doi.org/10.1002/asi.22688>
- Cole, R. J. (1998). Emerging trends in building environmental assessment methods. *Building Research & Information*, 26(1), 3–16. <https://doi.org/10.1080/096132198370065>
- CONAF, C. N. F. (1999). *Plan de manejo Reserva Nacional Rio Cruces*.
- CONAF, C. N. F. (2016). *INFORME MONITOREO AVIFAUNA - SANTUARIO DE LA NATURALEZA CARLOS ANWANDTER* (C. N. F. CONAF (ed.); Abril). <https://www.conaf.cl/wp-content/uploads/2016/07/Abril-2-2016.pdf>
- Connelly, K. A., Rollwagen-Bollens, G., & Bollens, S. M. (2020). Seasonal and longitudinal variability of zooplankton assemblages along a river-dominated estuarine gradient. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 245, 106980. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106980>
- Cortez, C., & Martinez, C. (2007). Características hidrográficas y sedimentológicas en el estuario del río Aconcagua, Chile Central. *Revista de Geografía Norte Grande*, 37, 63–74. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022007000100005>
- Coulbourne, W. L., Kriebel, D. L., Behm, R. L., & McKenna, K. K. (2021). *Guide for design of flood-resistant buildings*. National Research Council of Canada. <https://doi.org/10.4224/40002704>
- Cowardin, L. M., Carter, V., Golet, F. C., & Laroe, E. T. (2005). Classification of Wetlands and Deepwater Habitats of the United States. *Water Encyclopedia*, December 1979. <https://doi.org/10.1002/047147844x.sw2162>
- Custode, E., Noni, G., Trujillo, G., & Viennot, M. (1992). La cangahua en el Ecuador : caracterización morfo-edaforológica y comportamiento frente a la erosión = The cangahua in Ecuador : morpho-edaphologic characterization and susceptibility to erosion. *Terra*, 10.
- D'Alpaos, A., Mudd, S. M., & Carniello, L. (2011). Dynamic response of marshes to perturbations in suspended sediment concentrations and rates of relative sea level rise. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 116(4), 1–13. <https://doi.org/10.1029/2011JF002093>
- Das, B. (2010). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones* (Cengage Learning Editores (ed.); 7a ed.).
- De Andres, M., & Barragán, J. (2016). Desarrollo Urbano en el Litoral a Escala Mundial. Método de Estudio para su Cuantificación./ Urban-Coastal Development. Study Method for Quantifying in a Global Scale. *Revista de Estudios Andaluces*, 33. <https://doi.org/10.12795/rea.2016.i33.04>
- de Desarrollo Regional y Medio Ambiente Secretaría Ejecutiva para Asuntos Económicos y Sociales Organización de Estados Americanos, D. (1993). *Manual Sobre el Manejo de Peligros Naturales en la Planificación para el Desarrollo Regional Integrado. Cap. 8*.
- de Klijn-Chevalerias, M., & Javed, S. (2017). The Dutch approach for assessing and reducing environmental impacts of building materials. *Building and Environment*, 111, 147–159. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.003>
- de la Costa, O. (2021). *Observatorio de la Costa*. <https://www.observatoriodelacosta.cl/no-borde-sino-zona-costera-cientificos-tras-el-cambio/>

- de Ruig, L. T., Barnard, P. L., Botzen, W. J. W., Grifman, P., Hart, J. F., de Moel, H., Sadrpour, N., & Aerts, J. C. J. H. (2019). An economic evaluation of adaptation pathways in coastal mega cities: An illustration for Los Angeles. *Science of The Total Environment*, 678, 647–659. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.308>
- de Vivienda y Urbanismo, M. (2014). *Política Nacional de Desarrollo Urbano*.
- Deegan, L. A., Johnson, D. S., Warren, R. S., Peterson, B. J., Fleeger, J. W., Fagherazzi, S., & Wollheim, W. M. (2012). Coastal eutrophication as a driver of salt marsh loss. *Nature*, 490(7420), 388–392. <https://doi.org/10.1038/nature11533>
- Degrieck, J., Van Paepegem, W., Van Schepdael, L., Samyn, P., De Baets, P., Suister, E., & Leendertz, J. S. (2006). Characterization of Composites for the Maeslant Storm Surge Barrier. In *Fracture of Nano and Engineering Materials and Structures* (pp. 315–316). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/1-4020-4972-2\\_155](https://doi.org/10.1007/1-4020-4972-2_155)
- del Congreso Nacional de Chile, B. (2021). *Reporte Comunal*.
- Delgado, L. E., Tironi, A., Vila, I., Verardi, G., Ibanez, C., Aguero, B., & Marin, V. H. (2014). El humedal del Río Cruces, Valdivia, Chile: una síntesis ecosistémica. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 42(5), 937–949. <https://doi.org/10.3856/vol42-issue5-fulltext-1>
- Dennis, B., & Case, B. (1977). *Houseboat: Reflections of North America's Floating Homes ... History, Architecture, and Lifestyles*. Smugglers Cove Pub. <https://books.google.cl/books?id=UOTEAAAACAAJ>
- Díaz-Delgado, R. (2006). *Evento de mortalidad en la vegetación terrestre del Parque Nacional de Doñana*.
- Díaz-López, C., Carpio, M., Martín-Morales, M., & Zamorano, M. (2019). Analysis of the scientific evolution of sustainable building assessment methods. *Sustainable Cities and Society*, 49, 101610. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101610>
- DOP. (2017). *Estado Espigones Sumergidos Río Valdivia, Región de Los Ríos, Etapa 2*.
- Du, S., Scussolini, P., Ward, P. J., Zhang, M., Wen, J., Wang, L., Koks, E., Diaz-Loaiza, A., Gao, J., Ke, Q., & Aerts, J. C. J. H. (2020). Hard or soft flood adaptation? Advantages of a hybrid strategy for Shanghai. *Global Environmental Change*, 61, 102037. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102037>
- Duan, H., Zhang, H., Huang, Q., Zhang, Y., Hu, M., Niu, Y., & Zhu, J. (2016a). Characterization and environmental impact analysis of sea land reclamation activities in China. *Ocean & Coastal Management*, 130, 128–137. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.06.006>
- Duan, H., Zhang, H., Huang, Q., Zhang, Y., Hu, M., Niu, Y., & Zhu, J. (2016b). Characterization and environmental impact analysis of sea land reclamation activities in China. *Ocean & Coastal Management*, 130, 128–137. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.06.006>
- Dugan, P. . (1992). *Conservación de Humedales. Un análisis de temas de actualidad y acciones necesarias*. UICN.
- Dutch Ministry of Infrastructure and Water Management. (2022). *Building Code for Amphibious Houses in the Netherlands* (1st Editio). Sdu.
- Dyckman, C., St. John, C., & London, J. (2014). Realizing managed retreat and innovation in state-level coastal management planning. *Ocean & Coastal Management*, 102, 212–223. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.09.010>
- Dyer, K. R. (1998). *Estuaries : A Physical Introduction* (J. Wiley (ed.); 2nd ed.).
- Dykstra, S., & Dzwonkowski, B. (2020). The Propagation of Fluvial Flood Waves Through a Backwater-Estuarine Environment. *Water Resources Research*, 56. <https://doi.org/10.1029/2019WR025743>
- Edwards, H. G. M., Drummond, L., & Russ, J. (1998). Fourier-transform Raman spectroscopic study of pigments in native American Indian rock art: Seminole Canyon. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 54(12), 1849–1856. [https://doi.org/10.1016/S1386-1425\(98\)00077-8](https://doi.org/10.1016/S1386-1425(98)00077-8)

- Egghe, L. (2006). Theory and Practice of the g-Index. *Scientometrics*, 69. <https://doi.org/10.1007/s11192-006-0144-7>
- Ellis, J. T., Spruce, J. P., Swann, R. A., Smoot, J. C., & Hilbert, K. W. (2011). An assessment of coastal land-use and land-cover change from 1974–2008 in the vicinity of Mobile Bay, Alabama. *Journal of Coastal Conservation*, 15(1), 139–149. <https://doi.org/10.1007/s11852-010-0127-y>
- Elnashai, A., & Di Sarno, L. (2015). *Fundamentals of Earthquake Engineering: From Source to Fragility, 2nd Edition* (J. W. 6 & S. Ltd. (ed.); 2°).
- Elsharouny, M. R. M. M. (2016). Planning Coastal Areas and Waterfronts for Adaptation to Climate Change in Developing Countries. *Procedia Environmental Sciences*, 34, 348–359. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.04.031>
- Enaruvbe, G. O., & Ige-Olumide, O. (2015). Geospatial analysis of land-use change processes in a densely populated coastal city: the case of Port Harcourt, south-east Nigeria. *Geocarto International*, 30(4), 441–456. <https://doi.org/10.1080/10106049.2014.883435>
- English, E. C., Chen, M., Zarins, R., Patange, P., & Wisner, J. C. (2021). Building Resilience through Flood Risk Reduction: The Benefits of Amphibious Foundation Retrofits to Heritage Structures. *International Journal of Architectural Heritage*, 15(7), 976–984. <https://doi.org/10.1080/15583058.2019.1695154>
- Estrada, R., Harvey, M., Gosselin, M., Starr, M., Galbraith, P. S., & Straneo, F. (2012). Late-summer zooplankton community structure, abundance, and distribution in the Hudson Bay system (Canada) and their relationships with environmental conditions, 2003–2006. *Progress in Oceanography*, 101(1), 121–145. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pocean.2012.02.003>
- Fagherazzi, S., Kirwan, M. L., Mudd, S. M., Guntenspergen, G. R., Temmerman, S., D’Alpaos, A., van de Koppel, J., Rybczyk, J. M., Reyes, E., Craft, C., & Clough, J. (2012). Numerical models of salt marsh evolution: Ecological, geomorphic, and climatic factors. *Reviews of Geophysics*, 50(1), RG1002. <https://doi.org/10.1029/2011RG000359>
- FAO, P. C. O. M. I. (2011). *Resumen para la adopción de decisiones: Anteproyecto para la sostenibilidad del océano y las zonas costeras*.
- Farrapeira, C., Melo, A. V. O. M., Barbosa, D., & Silva, K. (2007). Ship hull fouling in the Port of Recife, Pernambuco. *Brazilian Journal of Oceanography*, 55, 207–221.
- Fastelli, P., Marcelli, M., Guerranti, C., & Renzi, M. (2018). Recent Changes of Ecosystem Surfaces and their Services Value in a Mediterranean Coastal Protected Area: the Role of Wetlands. *Thalassas: An International Journal of Marine Sciences*, 34(1), 233–245. <https://doi.org/10.1007/s41208-017-0057-7>
- Flanagan, B., & Garn, A. (2003). *The Houseboat Book*. Universe. <https://books.google.cl/books?id=rQIsAAAACAAJ>
- Foreman, M. G. G. (1977). Manual for tidal heights analysis and prediction. *Pacific Marine Science Report 77-10, Institute of Ocean Sciences*, 97.
- Garcés-Vargas, J., Ruiz, M., Pardo, L. M., Núñez, S., & Pérez-Santos, I. (2013). Caracterización hidrográfica del estuario del río Valdivia, centro-sur de Chile. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 41, 113–125. <https://doi.org/10.3856/vol41-issue1-fulltext-9>
- Garcés-Vargas, J., Schneider, W., Pinochet, A., Piñones, A., Vergara, F., Brieva, D., & Wan, Y. (2020). Tidally Forced Saltwater Intrusions might Impact the Quality of Drinking Water, the Valdivia River (40° S), Chile Estuary Case. *Water*, 12, 2387. <https://doi.org/10.3390/w12092387>
- García, A., Carpio, M., Giesecke, R., Bermúdez, M., & Díez-Minguito, M. (2021). Circulation and Distribution of Suspended Mesozooplankton Carcasses in a Mid- latitude Estuary. *Journal of Marine Systems*.
- Gedan, K. B., Silliman, B. R., & Bertness, M. D. (2009). Centuries of Human-Driven Change in Salt Marsh Ecosystems. *Annual Review of Marine Science*, 1(1), 117–141. <https://doi.org/10.1146/annurev.marine.010908.163930>
- Geyer, W. R., & MacCready, P. (2014). The Estuarine Circulation. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 46(1), 175–197. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010313-141302>

- Ghorbanzadeh, O., Moslem, S., Blaschke, T., & Duleba, S. (2019). Sustainable Urban Transport Planning Considering Different Stakeholder Groups by an Interval-AHP Decision Support Model. *Sustainability*, 11, 9. <https://doi.org/10.3390/su11010009>
- Giesecke, R., Vallejos, T., Sanchez, M., & Teiguie, K. (2017). Plankton dynamics and zooplankton carcasses in a mid-latitude estuary and their contributions to the local particulate organic carbon pool. *Continental Shelf Research*, 132, 58–68. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.csr.2016.07.020>
- Glasby, T., & Connell, S. (1999). *Urban structures as marine habitats* (F. A. O. of the UN (ed.)). ROYAL SWEDISH ACAD SCIENCES. <http://hdl.handle.net/2440/12039>
- Gobierno de Chile. (2014). *FIJA EL TEXTO REFUNDIDO, COORDINADO Y SISTEMATIZADO DE LA LEY Nº 15.840, DE 1964 Y DEL DFL. Nº 206, DE 1960*. 09-06-2014. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=97993&idVersion=2014-06-09>
- Golberg, E. (1994). *Coastal zone space: Prelude to conflict?* (United Nat). United Nations Educational.
- Gracia, A., Rangel-Buitrago, N., Oakley, J. A., & Williams, A. T. (2018). Use of ecosystems in coastal erosion management. *Ocean & Coastal Management*, 156, 277–289. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.07.009>
- Greve, F. (1949). Determinación del coeficiente de seguridad antisísmico para las diferentes zonas de Chile. *Anales De La Facultad De Ciencias Físicas Y Matemáticas*, 5(5), 3–19. <https://revistaestudiotributarios.uchile.cl/index.php/AFCFM/article/view/36936>
- Grimm, N., Faeth, S., Golubiewski, N., Redman, C., Wu, J., Bai, X., & Briggs, J. (2008). Global Change and the Ecology of Cities. *Science (New York, N. Y.)*, 319, 756–760. <https://doi.org/10.1126/science.1150195>
- Gutenberg, B., & Richter, C. (1945). Frequency of Earthquakes in California. *Nature*, 156(3960), 371. <https://doi.org/10.1038/156371a0>
- Haapio, A., & Viitaniemi, P. (2008). A critical review of building environmental assessment tools. *Environmental Impact Assessment Review*, 28(7), 469–482. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eiar.2008.01.002>
- Haigh, I., Pickering, M., Green, M., Arbic, B., Arns, A., Dangendorf, S., Hill, D., Horsburgh, K., Howard, T., Idier, D., Jay, D., Jänicke, L., Lee, S., Müller, M., Schindelegger, M., Talke, S. A., Wilmes, S.-B., & Woodworth, P. (2020). The Tides They Are A-Changin': A Comprehensive Review of Past and Future Nonastronomical Changes in Tides, Their Driving Mechanisms, and Future Implications. *Reviews of Geophysics*, 58. <https://doi.org/10.1029/2018RG000636>
- Hall, J. W., Harvey, H., & Manning, L. J. (2019). Adaptation thresholds and pathways for tidal flood risk management in London. *Climate Risk Management*, 24, 42–58. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.crm.2019.04.001>
- Hallegatte, S., Green, C., Nicholls, R. J., & Corfee-Morlot, J. (2013). Future flood losses in major coastal cities. *Nature Climate Change*, 3(9), 802–806. <https://doi.org/10.1038/nclimate1979>
- Halls, J. N., & Magolan, J. L. (2019). A Methodology to Assess Land Use Development, Flooding, and Wetland Change as Indicators of Coastal Vulnerability. In *Remote Sensing* (Vol. 11, Issue 19). <https://doi.org/10.3390/rs11192260>
- Harriss, R., Sebacher, D., Bartlett, K., Bartlett, D., & Crill, P. (1988). Sources of atmospheric methane in the South Florida environment. *Global Biogeochemical Cycles - GLOBAL BIOGEOCHEM CYCLE*, 2, 231–243. <https://doi.org/10.1029/GB002i003p00231>
- Hauenstein, E., & Ramirez, C. (1986). The influence of salinity on the distribution of *Egeria densa* in the Valdivia river basin, Chile. *Archiv Für Hydrobiologie*, 107(1), 511–520.
- He, B.-J., Ding, L., & Prasad, D. (2020). Relationships among local-scale urban morphology, urban ventilation, urban heat island and outdoor thermal comfort under sea breeze influence (free download: <https://authors.elsevier.com/a/1bBDe7sfVY-yVE>). *Sustainable Cities and Society*, 102289. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102289>
- Helbig, M., Chasmer, L. E., Desai, A. R., Kljun, N., Quinton, W. L., & Sonntag, O. (2017). Direct and indirect climate change effects on carbon dioxide fluxes in a thawing boreal forest-wetland

- landscape. *Global Change Biology*, 23(8), 3231–3248. <https://doi.org/10.1111/gcb.13638>
- Hermelin, M. (2003). Urbanismo y naturaleza en América Latina: Un matrimonio indisoluble. *Revista INVI*, 18, 32–40. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=25804704>
- Hinkel, J., Lincke, D., Vafeidis, A. T., Perrette, M., Nicholls, R. J., Tol, R. S. J., Marzeion, B., Fettweis, X., Ionescu, C., & Levermann, A. (2014). Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3292–3297. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222469111>
- HOBO. (2016). *Manual HOBO MX2300* (O. C. Corporation (ed.); 1st ed.). <https://assets.omega.com/manuals/HOBO MX2300 Manual.pdf>
- Horton, B., Rahmstorf, S., Engelhart, S., & Kemp, A. (2014). Expert assessment of sea-level rise by AD 2100 and AD 2300. *Quaternary Science Reviews*, 84, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.11.002>
- House, A. R., Thompson, J. R., & Acreman, M. C. (2016). Projecting impacts of climate change on hydrological conditions and biotic responses in a chalk valley riparian wetland. *Journal of Hydrology*, 534, 178–192. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.004>
- Huang, G. (2018). Enhancing Dialogue between Flood Risk Management and Road Engineering Sectors for Flood Risk Reduction. *Sustainability*, 10(6), 1773.
- Hurrell, J. A., Bazzano, D. H., & Delucchi, G. (2006). Dicotiledóneas herbáceas 1. Nativas y Exóticas. *Biota Rioplatense*, 12, 287.
- Hurtado Saldías, M., Sills Garrido, P., & Manríquez Cárdenas, C. (2018). Metodología para una rehabilitación arquitectónica sostenible: El caso de los palafitos de Chiloé. *Arquitecturas Del Sur*, 36(53), 36–57. <https://doi.org/10.22320/07196466.2018.36.053.04>
- inc. Warren Pinnacle Consulting. (2016a). *Advancing Existing Assessment of Connecticut Marshes' Response to SLR*.
- inc. Warren Pinnacle Consulting. (2016b). *SLAMM 6.7 Technical Documentation*. (inc. Warren Pinnacle Consulting (ed.); 6th ed.).
- INN (Instituto Nacional de Normalización). (2007). *NCH853.Of2007 Acondicionamiento térmico – Envoltente térmica de edificios – Calculo de resistencias y transmitancias térmicas*. (p. 51). INN.
- INN (Instituto Nacional de Normalización). (2014). *NCH1973.Of2014 Comportamiento higrotérmico de elementos y componentes de construcción - Temperatura superficial interior para evitar la humedad superficial crítica y la condensación intersticial - Métodos de cálculo* (p. 49). INN.
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- IPCC. (2022). Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities. In *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* (pp. 321–446). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157964.006>
- ISO, I. O. for S. (2014). *ISO13788 Hygrothermal performance of building components and building elements-Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation- Calculation methods* (p. 40).
- Kendrick, E., Bevis, M., Smalley, R., Brooks, B., Vargas, R. B., Lauría, E., & Fortes, L. P. S. (2003). The Nazca–South America Euler vector and its rate of change. *Journal of South American Earth Sciences*, 16(2), 125–131. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(03\)00028-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0895-9811(03)00028-2)
- Khan, J., & Hasan, S. (2020). GIS- Based Screening Model of Coastal City Karachi for Plantation of Biofuel Source. *Scientific Reports*, 10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61052-9>
- Kim. (2020a). The Economic Effects of Climate Change Adaptation Measures: Evidence from Miami-Dade County and New York City. *Sustainability*, 12(3), 1097. <https://doi.org/10.3390/su12031097>
- Kim, S. K. (2020b). The Economic Effects of Climate Change Adaptation Measures: Evidence from Miami-Dade County and New York City. In *Sustainability* (Vol. 12, Issue 3). <https://doi.org/10.3390/su12031097>

- Koh, H., Lim, Y., Seow, T., Stocks, D., & Thapar, A. (2008). The Floating Performance Stage @ Marina Bay, Singapore: New Possibilities for Space Creation. In *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE* (Vol. 3). <https://doi.org/10.1115/OMAE2008-57291>
- Kolker, A. S., Li, C., Walker, N. D., Pilley, C., Ameen, A. D., Boxer, G., Ramachandirane, C., Ullah, M., & Williams, K. A. (2014). The impacts of the great Mississippi/Atchafalaya River flood on the oceanography of the Atchafalaya Shelf. *Continental Shelf Research*, 34(1), 17–33. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2014.04.023>
- Kunreuther, H., & Weber, E. (2013). Aiding Decision-Making to Reduce the Impacts of Climate Change. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2368551>
- Lagos, N. A., Paolini, P., Jaramillo, E., Lovengreen, C., Duarte, C., & Contreras, H. (2008). Environmental processes, water quality degradation, and decline of waterbird populations in the Rio Cruces wetland, Chile. *Wetlands*, 28(4), 938–950. <https://doi.org/10.1672/07-119.1>
- Lai, S., Loke, L. H. L., Hilton, M. J., Bouma, T. J., & Todd, P. A. (2015). The effects of urbanisation on coastal habitats and the potential for ecological engineering: A Singapore case study. *Ocean & Coastal Management*, 103, 78–85. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.11.006>
- Laternus, T. (1986). *Floating Homes: A Houseboat Handbook*. Harbour Publishing Company. <https://books.google.cl/books?id=SzKjAAAACAAJ>
- Lengfeld, K., & Ament, F. (2012). Observing Local-Scale Variability of Near-Surface Temperature and Humidity Using a Wireless Sensor Network. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51, 30–41. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-025.1>
- Leonowicz, Z. (2020). 2020 IEEE International Conference Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I & CPS Europe). In Institute of Electrical and Electronics Engineers (Ed.), *Thermal insulation of existing buildings and interstitial condensation: comparative assessment in different European climate contexts* (pp. 9–12).
- Leyton, F., Ruiz, S., & Sepulveda, S. A. (2010). Reevaluacion del peligro sismico probabilistico en Chile central. *Andean Geology*, 37, 455–472. [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-71062010000200011&nrm=iso](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-71062010000200011&nrm=iso)
- Li, G., Sun, S., & Fang, C. (2018). The varying driving forces of urban expansion in China: Insights from a spatial-temporal analysis. *Landscape and Urban Planning*, 174, 63–77. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.03.004>
- Li, X., Bellerby, R., Craft, C., & Widney, S. (2018). Coastal wetland loss, consequences, and challenges for restoration. *Anthropocene Coasts*, 1–15. <https://doi.org/10.1139/anc-2017-0001>
- Li, Y., Shi, Y., Zhu, X., Cao, H., & Yu, T. (2014). Coastal wetland loss and environmental change due to rapid urban expansion in Lianyungang, Jiangsu, China. *Regional Environmental Change*, 14. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0552-1>
- Liu, G., Tan, Y., & Huang, Z. (2021). Knowledge Mapping of Homeowners' Retrofit Behaviors: An Integrative Exploration. *Buildings*, 11, 273. <https://doi.org/10.3390/buildings11070273>
- Liu, Q., Chai, F., Dugdale, R., Chao, Y., Xue, H., Rao, S., Wilkerson, F., Farrara, J., Zhang, H., Wang, Z., & Zhang, Y. (2018). San Francisco Bay nutrients and plankton dynamics as simulated by a coupled hydrodynamic-ecosystem model. *Continental Shelf Research*, 161, 29–48. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.csr.2018.03.008>
- Lomnitz, C. (1969). An earthquake risk map of Chile. In S. . Editorial Universitaria (Ed.), *Proceedings of the Fourth World Conference on Earthquake Engineering* (1st ed., pp. 161–171).
- Lomnitz, C. (2004). Major Earthquakes of Chile: A Historical Survey, 1535-1960. *Seismological Research Letters - SEISMOL RES LETT*, 75, 368–378. <https://doi.org/10.1785/gssrl.75.3.368>
- Lopetegui, E. J., Vollmann, R. S., Cifuentes, H. C., Valenzuela, C. D., Suarez, N. L., Herbach, E. P., Huepe, J. U., Jaramillo, G. V., Leischner, B. P., & Riveros, R. S. (2007). Emigration and mortality of Black-necked swans (*Cygnus melancoryphus*) and disappearance of the macrophyte *Egeria densa* in a Ramsar wetland site of southern Chile. *Ambio*, 36(7), 607–609. [https://doi.org/10.1579/0044-7447\(2007\)36\[607:eamobs\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2007)36[607:eamobs]2.0.co;2)

- López-Guerrero, R. E., Verichev, K., Moncada, G., & Carpio, M. (2022). How do urban heat islands affect the thermo-energy performance of buildings? *Journal of Cleaner Production*, 133713. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133713>
- Lorie, M., Neumann, J. E., Sarofim, M. C., Jones, R., Horton, R. M., Kopp, R. E., Fant, C., Wobus, C., Martinich, J., O'Grady, M., & Gentile, L. E. (2020). Modeling coastal flood risk and adaptation response under future climate conditions. *Climate Risk Management*, 29, 100233. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.crm.2020.100233>
- Luo, J., & Wei, Y. H. D. (2009). Modeling spatial variations of urban growth patterns in Chinese cities: The case of Nanjing. *Landscape and Urban Planning*, 91(2), 51–64. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.11.010>
- Lv, T., Wang, L., Xie, H., Zhang, X., & Zhang, Y. (2021). Evolutionary overview of water resource management (1990–2019) based on a bibliometric analysis in Web of Science. *Ecological Informatics*, 61, 101218. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101218>
- M.V., V., & Philip, P. M. (2022). Flood risk mitigation through self-floating amphibious houses - Modelling, analysis, and design. *Materials Today: Proceedings*, 65, 442–447. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.547>
- Macías, M., & García Navarro, J. (2010). Metodología y herramienta VERDE para la evaluación de la sostenibilidad en edificios. *Informes de La Construcción*, 62(517 SE-Artículos), 87–100. <https://doi.org/10.3989/ic.08.056>
- Madera 21. (2020). *¿Por qué la madera?* <https://www.madera21.cl/2757-2/>
- Manioğlu, G., & Yılmaz, Z. (2006). Economic evaluation of the building envelope and operation period of heating system in terms of thermal comfort. *Energy and Buildings*, 38(3), 266–272. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.06.009>
- Mannucci, S., Rosso, F., D'Amico, A., Bernardini, G., & Morganti, M. (2022). Flood Resilience and Adaptation in the Built Environment: How Far along Are We? *Sustainability*, 14(7), 4096. <https://doi.org/10.3390/su14074096>
- Marani, M., D'Alpaos, A., Lanzoni, S., Carniello, L., & Rinaldo, A. (2010). The importance of being coupled: Stable states and catastrophic shifts in tidal biomorphodynamics. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 115(4), 1–15. <https://doi.org/10.1029/2009JF001600>
- Marin, V. H., Delgado, L. E., Vila, I., Tironi, A., Barrera, V., & Ibáñez, C. (2014). Regime shifts of Cruces River wetland ecosystem: current conditions, future uncertainties. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 42, 160–171. [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-560X2014000100013&nrm=iso](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-560X2014000100013&nrm=iso)
- Martin, A. (1990). *Hacia una nueva regionalización y cálculo del peligro sísmico en Chile*. Universidad de Chile.
- Maturana, F., Peña-Cortés, F., Carrasco, F. R., & Telias, M. (2019). Urban dynamics and transition to metropolitan spaces: The Valdivia case and Ríos Region, Chile | Dinámicas urbanas y transición hacia espacios metropolitanos: El caso de Valdivia y la Región de Los Ríos, Chile. *Urbe*, 11. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.011.e20180143>
- Ministerio de Medio Ambiente. (2020). *Valdivia es la segunda comuna con más humedales urbanos en Chile*. 21 Agosto.
- Ministerio de Obras Públicas. (2017). *"Estado Espigones Sumergidos Río Valdivia, Región de Los Ríos" - Informe de mareas*. Julio.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2022). *Listado de Normas Técnicas Obligatorias*. <http://normastecnicas.minvu.cl/>
- Ministerio del Medio Ambiente (Gobierno de Chile). (2019). *Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile* (Pontificia Universidad Católica de Chile (ed.); 1a ed.). Centro de Cambio climático Global UC. <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/04/2019-10-22-Informe-V02-CCCostas-Exposición-Rev1.pdf>
- MINVU. (2016a). *M10 SOLUCION CONSTRUCTIVA DE ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO PDA VALDIVIA*. <https://www.calificacionenergetica.cl/media/Ficha-M10-PDA-Valdivia.pdf>

- MINVU. (2016b). *M9 SOLUCION CONSTRUCTIVA DE ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO PDA VALDIVIA*. <https://www.calificacionenergetica.cl/media/Ficha-M9-PDA-Valdivia.pdf>
- MINVU. (2021). *PRC Los Ríos | Geoportal Open Data Minvu*. [https://ide.minvu.cl/maps/b7210174935d44ba8f931b2f07d59c0f\\_1/about](https://ide.minvu.cl/maps/b7210174935d44ba8f931b2f07d59c0f_1/about)
- MINVU. (2023). *Planes de Descontaminación Atmosférica - Ministerio de Vivienda y Urbanismo*. <https://www.minvu.gob.cl/planes-de-descontaminacion-atmosferica/#collapsesiete>
- Moftakhari Rostamkhani, H., Salvadori, G., AghaKouchak, A., Sanders, B., & Matthew, R. (2017). Compounding effects of sea level rise and fluvial flooding. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114, 201620325. <https://doi.org/10.1073/pnas.1620325114>
- MOP. (2023). *Ministerio de Obras Públicas*. <https://www.mop.cl/Faq/Paginas/DetalleFAQ.aspx?item=101>
- Morris, J. T., Sundareshwar, P. V., Nietch, C. T., Kjerfve, B., & Cahoon, D. R. (2002). RESPONSES OF COASTAL WETLANDS TO RISING SEA LEVEL. *Ecology*, 83(10), 2869–2877. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2002\)083\[2869:ROCWTR\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2002)083[2869:ROCWTR]2.0.CO;2)
- Mueller, P., Schile-Beers, L. M., Mozdzer, T. J., Chmura, G. L., Dinter, T., Kuzyakov, Y., De Groot, A. V., Esselink, P., Smit, C., D'Alpaos, A., Ibáñez, C., Lazarus, M., Neumeier, U., Johnson, B. J., Baldwin, A. H., Yarwood, S. A., Montemayor, D. I., Yang, Z., Wu, J., ... Nolte, S. (2018). Global-change effects on early-stage decomposition processes in tidal wetlands-implications from a global survey using standardized litter. *Biogeosciences*, 15(10), 3189–3202. <https://doi.org/10.5194/bg-15-3189-2018>
- Muñoz-Pedrerros, A. (2003). Guía de los humedales del río Cruces. *CEA Ediciones, Valdivia, Chile, January 2003*, 143.
- Nalbandian, K. M., Carpio, M., & González, Á. (2021). Analysis of the scientific evolution of self-healing asphalt pavements: Toward sustainable road materials. *Journal of Cleaner Production*, 293, 126107. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126107>
- NASA. (2021). *Sea Level Projection Tool – NASA Sea Level Change Portal*. [https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool?psmsl\\_id=2262](https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool?psmsl_id=2262)
- Nations, U. (2015). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development*. New York: United Nations, Department of Economic and Social Affairs.
- Nations, U. (2022). *Población | Naciones Unidas*. <https://www.un.org/es/global-issues/population>
- Nazarnia, H., Nazarnia, M., Sarmasti, H., & Wills, W. (2020). A Systematic Review of Civil and Environmental Infrastructures for Coastal Adaptation to Sea Level Rise. *Civil Engineering Journal*, 6, 1375–1399. <https://doi.org/10.28991/cej-2020-03091555>
- Nekooie, M. A., Mohamad, M. I., & Ismail, Z. (2017). Drag coefficient for amphibious house. *Urban Water Journal*, 14(10), 1045–1057. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2017.1325914>
- Nicholls, R. (2011). Planning for the Impacts of Sea Level Rise. *Oceanography*, 24, 144–157. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2011.34>
- Nicholls, R. J., & Hoozemans, F. M. J. (1996). The Mediterranean: vulnerability to coastal implications of climate change. *Ocean & Coastal Management*, 31(2), 105–132. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0964-5691\(96\)00037-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0964-5691(96)00037-3)
- Nillesen, A. L. (2022). *Chapter 24 - Designing and building flood proof houses* (S. Brody, Y. Lee, & B. B. B. T.-C. F. R. R. Kothuis (eds.); pp. 329–339). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85251-7.00024-X>
- ONU. (2017). *Las personas y los océanos*. <https://www.onu.org.mx/las-personas-y-los-ocenos/>
- Pardo, L. M., Cardyn, C., & Garcés-Vargas, J. (2012). Spatial variation in the environmental control of crab larval settlement in a micro-tidal austral estuary. *Helgoland Marine Research*, 66, 253–263. <https://doi.org/10.1007/s10152-011-0267-y>
- Pardo, L. M., Gonzalez, K., Fuentes, J., Paschke, K., & Chaparro, O. (2011). Survival and behavioral responses of juvenile crabs of *Cancer edwardsii* to severe hyposalinity events triggered by increased runoff at an estuarine nursery ground. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 404(1–

- 2), 33–39. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2011.05.004>
- Pardo, L. M., Mora-Vásquez, P., & Garcés-Vargas, J. (2012). Asentamiento diario de megalopos de jaibas del género *Cancer* en un estuario micromareal. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 40, 142–152. <https://doi.org/10.3856/vol40-issue1-fulltext-14>
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., & Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis with error analysis in MATLAB using T\_TIDE. *Computers & Geosciences*, 28, 929–937. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(02\)00013-4](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(02)00013-4)
- Peña, D. (2005). *Fundamentos de estadística* (A. Editorial (ed.); 1a ed.).
- Pereira, C. D., & Ghisi, E. (2011). The influence of the envelope on the thermal performance of ventilated and occupied houses. *Energy and Buildings*, 43(12), 3391–3399. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.001>
- Pérez Lancellotti, G. (2014). El Plan Maestro como instrumento de diseño urbano: potencialidades y limitantes. El caso de la ciudad de Antofagasta. *AUS*, 15, 16–21. <https://doi.org/10.4206/aus.2014.n15-04>
- Perillo, G., Piccolo, M., & Pino, M. (1999). *Estuaries of South America* (1st ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-60131-6>
- Pillen, S., Scheerlinck, K., & Daele, E. Van. (2017). Waterscapes in transformation: The case of the Belgian coastal area. *Plan Journal*, 2(2), 743–766. <https://doi.org/10.15274/tpj.2017.02.02.26>
- Pino, Mario; Perillo, G. M. E., & Santamarina, P. (1994). Residual Fluxes in a Cross-section of the Valdivia River Estuary, Chile. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 38(5), 491–505. <https://doi.org/https://doi.org/10.1006/ecss.1994.1034>
- Pirazzoli, P. A. (1991). Possible Defenses against a Sea-Level Rise in the Venice Area, Italy1. *Journal of Coastal Research*, 7(1), 231–248. <http://www.jstor.org/stable/4297819>
- Polanco, H., Hayes, S., Roble, C., Krupitsky, M., & Branco, B. (2020). The presence and significance of microplastics in surface water in the Lower Hudson River Estuary 2016–2019: A research note. *Marine Pollution Bulletin*, 161, 111702. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111702>
- Poso, F. J. (2018). *Bouyancy. The Archimedes Principle*. Bod Third Party Titles. <https://books.google.cl/books?id=L19uvQEACAAJ>
- Poulsen Rydborg, M., Lauring, M., & Brunggaard, C. (2019). Vulnerabilities and resilience in Danish housing stock: A comparative study of architectural answers to climate change in Danish housing in relation to other oceanic climates. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 111). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911103068>
- Pourebahim, S., Hadipour, M., Mokhtar, M., & Taghavi, S. (2014). Application of VIKOR and fuzzy AHP for conservation priority assessment in coastal areas: Case of Khuzestan district, Iran. *Ocean & Coastal Management*, 98, 20–26. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.05.009>
- Pozo, K., Perra, G., Menchi, V., Urrutia, R., Parra, O., Rudolph, A., & Focardi, S. (2011). Levels and spatial distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediments from Lengua Estuary, central Chile. *Marine Pollution Bulletin*, 62(7), 1572–1576. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.04.037>
- Rahmati, O., Zeinivand, H., & Besharat, M. (2015). Flood hazard zoning in Yasooj region, Iran, using GIS and multi-criteria decision analysis. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. <https://doi.org/10.1080/19475705.2015.1045043>
- Ramírez, C., San Martín, C., Medina, R., & Contreras, D. (1991). Estudio de la flora hidrófila del Santuario de la Naturaleza “Río Cruces” (Valdivia, Chile). *Gayana, Bot.*, 48 (1-4): 67-80.
- Reinhardt, E. G., Nairn, R. B., & Lopez, G. (2010). Recovery estimates for the Río Cruces after the May 1960 Chilean earthquake. *Marine Geology*, 269(1–2), 18–33. <https://doi.org/10.1016/J.MARGEO.2009.12.003>
- Rimer, A. E., Nissen, J. A., & Reynolds, D. E. (1978). Characterization and Impact of Stormwater Runoff from Various Land Cover Types. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 50(2), 252–264.

- <http://www.jstor.org/stable/25039539>
- Rivera Campos, P., & Tendero Caballero, R. (2021). Vernacular architecture in the palafitos from Chiloé = Arquitectura vernácula en palafitos de Chiloé. *Building & Management*, 5(2), 7. <https://doi.org/10.20868/bma.2021.2.4682>
- Rodríguez, G., Rivera, L., & Burgos, D. (2012). *Humedad por Condensación en Viviendas Prevención y Soluciones* (Corporación de Desarrollo Tecnológico CDT (ed.); 1ra ed.).
- Rojas, C. (2010). *Valdivia 1960, Entre Aguas y Escombros* (U. A. de Chile (ed.); 1a Edición).
- Rojas Hoppe, C., & Díez Lorente, S. (2013). El terremoto chileno del 27 de febrero de 2010: análisis preliminar de las consecuencias en la ciudad de Valdivia. *Investigaciones Geográficas*, 60, 139. <https://doi.org/10.14198/INGEO2013.60.08>
- Rosenzweig, C., Solecki, W. D., Blake, R., Bowman, M., Faris, C., Gornitz, V., Horton, R., Jacob, K., LeBlanc, A., Leichenko, R., Linkin, M., Major, D., O'Grady, M., Patrick, L., Sussman, E., Yohe, G., & Zimmerman, R. (2011). Developing coastal adaptation to climate change in the New York City infrastructure-shed: process, approach, tools, and strategies. *Climatic Change*, 106(1), 93–127. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-0002-8>
- Ruiz-Luna, A., & Berlanga-Robles, C. (2003). Land use, land cover changes and coastal lagoon surface reduction associated with urban growth in northwest Mexico. *Landscape Ecology*, 18, 159–171. <https://doi.org/10.1023/A:1024461215456>
- Ryan, M. G., Watkins, L., & Walter, M. T. (2019). Hudson River juvenile Blueback herring avoid ingesting microplastics. *Marine Pollution Bulletin*, 146, 935–939. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.07.004>
- Sadler, J., Goodall, J., Morsy, M., & Spencer, K. (2018). Modeling urban coastal flood severity from crowd-sourced flood reports using Poisson regression and Random Forest. *Journal of Hydrology*, 559, 43–55. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.01.044>
- Salazar-Concha, C., Ficapal-Cusí, P., Boada-Grau, J., & Camacho, L. J. (2021). Analyzing the evolution of technostress: A science mapping approach. *Heliyon*, 7(4), e06726. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06726>
- Sallenger, A., Doran, K., & Howd, P. (2012). Hotspot of accelerated sea-level rise on the Atlantic Coast of North America. *Nature Climate Change*, 2, 884–888. <https://doi.org/10.1038/nclimate1597>
- Sanhueza, S., Cardenas, N., & Verichev, K. (2022). *Diseño de soluciones constructivas de una vivienda tipo, para reducir las emisiones de carbono, en regiones del sur de Chile*. Austral de Chile.
- Santana, M., & Cobo, M. J. (2020). What is the future of work? A science mapping analysis. *European Management Journal*, 38(6), 846–862. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.emj.2020.04.010>
- Schaefer, K., & Einax, J. W. (2010). Analytical and chemometric characterization of the Cruces River in South Chile. *Environmental Science and Pollution Research*, 17(1), 115–123. <https://doi.org/10.1007/s11356-009-0116-6>
- Schiller, A., de Sherbinin, A., Hsieh, W.-H., & Pulsipher, A. (2007). The Vulnerability of Global Cities to Climate Hazards. *Environment and Urbanization*, 19. <https://doi.org/10.1177/0956247807076725>
- Schwarz, A. O., Urrutia, H., Vidal, J. M., & Pérez, N. (2012). Chlorate reduction capacity and characterisation of chlorate reducing bacteria communities in sediments of the rio Cruces wetland in southern Chile. *Water Research*, 46(10), 3283–3292. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.03.046>
- Seto, K., Sanchez-Rodriguez, R., & Fragkias, M. (2010). The New Geography of Contemporary Urbanization and the Environment. *Annual Review of Environment and Resources*, 35. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-100809-125336>
- Sharifi, A. (2021). Urban sustainability assessment: An overview and bibliometric analysis. *Ecological Indicators*, 121, 107102. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107102>
- Shen, J., Qin, Q., Wang, Y., & Sisson, M. (2019). A data-driven modeling approach for simulating algal blooms in the tidal freshwater of James River in response to riverine nutrient loading. *Ecological Modelling*, 398, 44–54. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2019.02.005>

- Shi, P., Zhang, Y., Li, Z., Li, P., & Xu, G. (2017). Influence of land use and land cover patterns on seasonal water quality at multi-spatial scales. *CATENA*, *151*, 182–190. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.12.017>
- SHOA (Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile). (2015). *Catálogo de cartas y publicaciones náuticas*. <http://www.shoa.cl/php/cartas-nauticas?idioma=es>
- Shoemaker, R. C., & House, D. E. (2006). Sick building syndrome (SBS) and exposure to water-damaged buildings: Time series study, clinical trial and mechanisms. *Neurotoxicology and Teratology*, *28*(5), 573–588. <https://doi.org/10.1016/j.ntt.2006.07.003>
- Sithole, A. (2012). *Building in Wetlands to Meet the Housing Demand and Urban Growth in Harare*.
- Smart, L. S., Vukomanovic, J., Sills, E. O., & Sanchez, G. (2021). Cultural ecosystem services caught in a 'coastal squeeze' between sea level rise and urban expansion. *Global Environmental Change*, *66*, 102209. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102209>
- Stuardo, José; Valdovinos, C. (1989). Estuarios y lagunas costeras: ecosistemas importantes del Chile central. *Ambiente y Desarrollo*, *Nº1*, 107–115. <http://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/123456789/24388>
- Su, L., Sharp, S., Pettigrove, V., Craig, N., Nan, B., Du, F., & Shi, H. (2019). Superimposed microplastic pollution in a coastal metropolis. *Water Research*, *168*, 115140. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115140>
- Survey, U. S. G. (2022). *GloVis*. <https://glovis.usgs.gov/app>
- Thomé, A. M., Scavarda, L., & Scavarda, A. (2016). Conducting systematic literature review in operations management. *Production Planning & Control*, *27*, 1–13. <https://doi.org/10.1080/09537287.2015.1129464>
- Thornes, J. (2002). IPCC, 2001: Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability, Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by J. J. McCarthy, O. F. Canziani, N. A. Leary, D. J. Dokken a. *International Journal of Climatology*, *22*. <https://doi.org/10.1002/joc.775>
- Torabi, E., Dedekorkut-Howes, A., & Howes, M. (2018). Adapting or maladapting: Building resilience to climate-related disasters in coastal cities. *Cities*, *72*, 295–309. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2017.09.008>
- UNEP. (2009). *Estuaries of Latin America: A Guide to Sustainable Development* (1st ed.). United Nations Environment Programme.
- UNESCO. (2020). *How Much Does Your Country Invest in R&D?* <http://uis.unesco.org/apps/visualisations/research-and-development-spending/>
- Urbina, R., & Ramirez, A. (2003). *Guía para el diseño de pilotes*. de Piura.
- Valdebenito, G., & Ortega, M. (2020). *Evaluación del peligro sísmico uniforme en la Región de los Ríos*.
- Valle-Levinson, A. (2011). 1.05 - *Classification of Estuarine Circulation* (E. Wolanski & D. B. T.-T. on E. and C. S. McLusky (eds.); pp. 75–86). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374711-2.00106-6>
- Van Overveld, M., Van der Graaf, J., Eggink-Eilander, S., & Berghuis, M. (2011). *Praktijkboek bouwbesluit 2012* (W. Kluwer (ed.); 3rd ed).
- Vargas, C., Araneda, S., & Valenzuela, G. (2003). Influence of tidal phase and circulation on larval fish distribution in a partially mixed estuary, Corral Bay, Chile. *Journal of the Marine Biological Association of the UK*, *83*, 217–222. <https://doi.org/10.1017/S0025315403006994h>
- Verichev, K., Mikhaylyukova, P., Salazar, C., & Carpio, M. (2018). Dynamics of Built-Up Areas over The Past 30 Years According to Remote Sensing Data in the City of Valdivia, Chile. *IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 814–817. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8517582>
- Verichev, K., Zamorano, M., Salazar-Concha, C., & Carpio, M. (2021). Analysis of Climate-Oriented Researches in Building. *Applied Sciences*, *11*(7), 3251. <https://doi.org/10.3390/app11073251>

- Vidal, C., & Romero, H. (2010). Efectos ambientales de la urbanización de las cuencas de los ríos Bío-Bío y Andalién sobre los riesgos de inundación y anegamiento de la ciudad de Concepción. *Pontificia Universidad Católica de Chile. Instituto de Geografía*.
- Vitousek, S., Barnard, P., Fletcher, C., Frazer, N., Erikson, L., & Storlazzi, C. (2017). Doubling of coastal flooding frequency within decades due to sea-level rise. *Scientific Reports*, 7. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01362-7>
- Wahl, T., Jain, S., Bender, J., Meyers, S., & Luther, M. (2015). Increasing risk of compound flooding from storm surge and rainfall for major US cities. *Nature Climate Change*, 5. <https://doi.org/10.1038/nclimate2736>
- Wang, G., Liu, Y., Wang, H., & Wang, X. (2014). A comprehensive risk analysis of coastal zones in China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 140, 22–31. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.12.019>
- Wang, L., Li, C., Ying, Q., Cheng, X., Wang, X., Li, X., Hu, L., Liang, L., Yu, L., Huang, H., & Gong, P. (2012). China's urban expansion from 1990 to 2010 determined with satellite remote sensing. *Chinese Science Bulletin*, 57. <https://doi.org/10.1007/s11434-012-5235-7>
- Wang, Z., Wang, H., Shen, J., Ye, F., Zhang, Y., Chai, F., Liu, Z., & Du, J. (2019). An analytical phytoplankton model and its application in the tidal freshwater James River. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 224, 228–244. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.04.051>
- Wardekker, J. A., de Jong, A., Knoop, J. M., & van der Sluijs, J. P. (2010). Operationalising a resilience approach to adapting an urban delta to uncertain climate changes. *Technological Forecasting and Social Change*, 77(6), 987–998. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.techfore.2009.11.005>
- World Bank. (2002). *Estuaries of Latin America: A Framework for Sustainable Development* (1st ed.). World Bank.
- Wu, W., Zhi, C., Gao, Y., Chen, C., Chen, Z., Su, H., Lu, W., & Tian, B. (2022). Increasing fragmentation and squeezing of coastal wetlands: Status, drivers, and sustainable protection from the perspective of remote sensing. *Science of The Total Environment*, 811, 152339. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152339>
- Xie, Z., Liu, J., Zhu, G., Shao, Q., & Xu, X. (2011). Evaluating Habitat Change and Boundary Adjustment of a Nature Reserve in Coastal Wetlands: Case Study of Beidagang Nature Reserve, China. *Journal of Coastal Research*, 27(5), 966–972. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-10-00134.1>
- Yang, X., & Liu, Z. (2005). Using satellite imagery and GIS for land-use and land-cover change mapping in an estuarine watershed. *International Journal of Remote Sensing - INT J REMOTE SENS*, 26, 5275–5296. <https://doi.org/10.1080/01431160500219224>
- Zhang, H., & Yoshino, H. (2010). Analysis of indoor humidity environment in Chinese residential buildings. *Building and Environment*, 45(10), 2132–2140. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.03.011>
- Zhang, Y., Chen, R., & Wang, Y. (2020). Tendency of land reclamation in coastal areas of Shanghai from 1998 to 2015. *Land Use Policy*, 91, 104370. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104370>
- Zhao, D., He, H. S., Wang, W. J., Wang, L., Du, H., Liu, K., & Zong, S. (2018). Predicting Wetland Distribution Changes under Climate Change and Human Activities in a Mid- and High-Latitude Region. In *Sustainability* (Vol. 10, Issue 3). <https://doi.org/10.3390/su10030863>
- Zhou, X., Okaze, T., Ren, C., Cai, M., Ishida, Y., Watanabe, H., & Mochida, A. (2020). Evaluation of urban heat islands using local climate zones and the influence of sea-land breeze. *Sustainable Cities and Society*, 55, 102060. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102060>
- Zhou, Z., Coco, G., Townend, I., Olabarrieta, M., Wegen, M., Gong, Z., D'Alpaos, A., Gao, S., Jaffe, B., Guy, G., Qing, H., Wang, Y. P., Lanzoni, S., Wang, Z. B., Han, W., & Changkuan, Z. (2017). Is “Morphodynamic Equilibrium” an oxymoron? *Earth-Science Reviews*, 165, 257–267. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.12.002>
- Zhu, C., & Zeng, Y. (2018). Effects of urban lake wetlands on the spatial and temporal distribution of air PM10 and PM2.5 in the spring in Wuhan. *Urban Forestry & Urban Greening*, 31, 142–156. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.02.008>

