



UNIVERSIDAD DE CHILE

Facultad de Arquitectura y Urbanismo

Escuela de Pregrado

Carrera de Geografía

**"ANÁLISIS MULTITEMPORAL DEL CAMBIO DE COBERTURA Y USO DE SUELO
ENTRE 2002 - 2022 Y SU PROYECCIÓN AL AÑO 2040, EN EL SECTOR 'EL PANUL',
COQUIMBO: EFECTOS SOBRE EL ECOSISTEMA DE MATORRAL COSTERO
SEMIÁRIDO"**

Memoria para optar al título de Geógrafo

BENJAMÍN I. TORO FERNÁNDEZ

PROFESOR GUÍA:

Rodrigo Vargas Rona

SANTIAGO – CHILE

2023

Agradecimientos

A Antonia y Delfina, mi familia pequeña. Por su entrega constante y apoyo incondicional, esta memoria no la habría podido terminar sin ustedes. Agradezco cada segundo de mi vida por habernos cruzado en este espacio, gracias por permitirme transitarlo junto a ustedes.

A Sara y Hugo, mis padres, por alimentar constantemente mi curiosidad, por permitirme el juego y el crecer en libertad.

A Marjorie, Carolina y Scarlett del Movimiento EcoPanul, por su entrega incansable por la protección y conservación del patrimonio natural y cultural de El Panul. No tengo ninguna duda que sin el trabajo levantado a pulso por ustedes, la pérdida de biodiversidad del sector sería aún mayor.

A Sergio Ibáñez y Ana Sandoval, por ser tan generosos con su conocimiento y por su amor intransable hacia la Naturaleza.

A mi profesor guía, Rodrigo Vargas Rona por su infinita paciencia y por enseñarnos en sus cátedras a observar y sentir la Naturaleza, muchas gracias.

Les agradezco enormemente la ayuda prestada para la elaboración de esta memoria.

Resumen

El presente trabajo busca identificar los cambios de Cobertura y Usos de Suelo (CCUS) a gran escala en el sector El Panul, Coquimbo, a través de un análisis fotointerpretativo de imágenes Landsat mediante la utilización de Sistemas de Información Geográfica para los años 2002, 2013 y 2022 para generar una proyección al año 2040 sin intervenciones, siguiendo las pautas de crecimiento observadas en los años anteriores. Para esto se utilizó la red neuronal artificial *Perceptrón multicapa* y *cadena de Markov*, herramientas ofrecidas por el módulo *Land Change Modeler* de TerrSet.

Los resultados dan cuenta de un aumento progresivo para el periodo 2002 – 2022 de las áreas residenciales, disminuyendo las coberturas de vegetación dispersas y medias, mientras que las coberturas más densas donde se distribuyen poblaciones de *Myrcianthes coquimbensis* presentan más estabilidad. Para el año proyectado 2040, las tendencias de crecimiento urbano siguen en alza. Por medio de esta información se buscó evaluar el impacto del crecimiento urbano sobre el ecosistema de matorral costero semiárido y reflexionar sobre la necesidad de conservar la biodiversidad de este ecosistema.

Finalmente, se busca explorar en las posibles implicancias que los cambios de Cobertura y Usos de Suelo puedan tener en la conservación de la flora y fauna locales, buscando aportar con perspectivas para la toma de decisiones futuras en la planificación del territorio.

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|---|----|
| CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN..... | 1 |
| 1.1 INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 2 |
| 1.3 ESTADO DEL ARTE..... | 4 |
| 1.3.1 Expansión Urbana..... | 4 |
| 1.3.2 Cambios en la cobertura y uso de suelo..... | 4 |
| 1.3.3 Ecosistemas semiáridos..... | 6 |
| 1.3.4 Territorio..... | 8 |
| 1.3.5 Ordenamiento Territorial..... | 9 |
| 1.3.6 Modelos de cambio de uso de suelo..... | 11 |
| 1.4 ÁREA DE ESTUDIO..... | 13 |
| 1.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN..... | 19 |
| 1.5.1 Objetivo General..... | 19 |
| 1.5.2 Objetivos Específicos..... | 19 |
| CAPITULO 2: PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO..... | 20 |
| 2.1 MARCO METODOLÓGICO..... | 20 |
| 2.1.1 RESUMEN MARCO METODOLÓGICO..... | 24 |
| CAPITULO 3: RESULTADOS..... | 25 |
| 3.1 CAMBIOS EN LA COBERTURA Y USOS DE SUELO, PERIODO 2002 – 2022 | 25 |
| 3.1.1 Cambios en las Categorías de Vegetación..... | 25 |
| 3.1.2 Transición hacia áreas Industriales y Comerciales..... | 28 |
| 3.1.3 Humedales..... | 28 |
| 3.2 CAMBIOS EN LA COBERTURA Y USOS DE SUELO, SUBPERIODO 2002 – 2013. 30 | |
| 3.2.1 Cambios en las Categorías de Vegetación..... | 30 |
| 3.2.2 Transiciones Suelo Desnudo y Residenciales..... | 31 |
| 3.2.3 Estabilidad en Clases Industriales..... | 33 |
| 3.3 CAMBIOS EN LA COBERTURA Y USOS DE SUELO, SUBPERIODO 2013 – 2022. 35 | |
| 3.3.1 Cambios en las Categorías de Vegetación..... | 35 |
| 3.3.2 Transiciones Suelo Desnudo y Residenciales..... | 36 |
| 3.3.3 Estabilidad en Clases Industriales..... | 37 |
| 3.4 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO..... | 39 |
| 3.5 ANÁLISIS DE CAMBIO DE COBERTURA PERIODO PROYECTADO 2022 – 2040 . 41 | |
| 3.5.1 Cambios en las categorías de Vegetación..... | 41 |

| | |
|---|----|
| 3.5.2 Transición desde Suelo Desnudo a Residencial..... | 42 |
| 3.5.3 Importancia para la conservación..... | 44 |
| CAPÍTULO 4: DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 49 |
| 4.1 DISCUSION | 49 |
| 4.2 CONCLUSIONES | 51 |
| 4.3 RECOMENDACIONES | 53 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 54 |
| ANEXOS..... | 60 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Fig. 1. Tipos de distribución espacial en paisajes áridos y semiáridos..... | 7 |
| Fig. 2. Imágenes de venta de parcelas en el sector El Panul..... | 13 |
| Fig. 3. Cartografía Localización Área de Estudio | 15 |
| Fig. 4. Vista panorámica Ensenada El Panul..... | 16 |
| Fig. 5. Esquema Marco Metodológico | 24 |
| Fig. 6. Gráfico de Evolución Coberturas Naturales periodo 2002 – 2022..... | 25 |
| Fig. 7. Contribuciones al Cambio Neto Residencial periodo 2002 – 2022..... | 27 |
| Fig. 8. Contribuciones al Cambio Neto Suelo Desnudo periodo 2002 – 2022..... | 27 |
| Fig. 9. Mapas CUS periodo 2002 – 2022..... | 29 |
| Fig. 10. Gráfico de Evolución Coberturas Naturales subperiodo 2002 – 2013 | 30 |
| Fig. 11. Contribuciones al Cambio Neto Vegetación Media subperiodo 2002 – 2013..... | 31 |
| Fig. 12. Contribuciones al Cambio Neto Vegetación Densa subperiodo 2002 – 2013..... | 31 |
| Fig. 13. Gráfico transición de Coberturas de Vegetación subperiodo 2002 – 2013..... | 32 |
| Fig. 14. Mapas CUS subperiodo 2002 – 2013 | 34 |
| Fig. 15. Gráfico de Evolución Coberturas Naturales subperiodo 2013 – 2022 | 35 |
| Fig. 16. Contribuciones al Cambio Neto Residencial subperiodo 2013 – 2022 | 37 |
| Fig. 17. Contribuciones al Cambio Neto Suelo Desnudo subperiodo 2013 – 2022 | 37 |
| Fig. 18. Mapas CUS subperiodo 2013 – 2022 | 38 |
| Fig. 19. Gráfico de Evolución Coberturas Naturales periodo 2022 – 2040..... | 41 |
| Fig. 20. Contribuciones al Cambio Neto Residencial periodo 2022 – 2040..... | 42 |
| Fig. 21. Contribuciones al Cambio Neto Suelo Desnudo periodo 2022 – 2040..... | 42 |
| Fig. 22. Límites urbanos proyectados año 2040 | 43 |
| Fig. 23. Mapas CUS periodo 2022 - 2040..... | 48 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Localización parcelas de muestreo, sector El Panul | 16 |
| Tabla 2. Especies presentes dentro y fuera de parcela de muestreo “Punta Tacho” localidad El Panul | 17 |
| Tabla 3. Especies presentes dentro y fuera de parcela de muestreo “Ensenada Panul” localidad El Panul. | 18 |
| Tabla 4. Características de las imágenes satelitales descargas desde USGS..... | 20 |
| Tabla 5. Coberturas y usos de suelo identificados en el sector El Panul | 21 |
| Tabla 6. Matriz de transición CCUS 2002 – 2013 para predecir el año 2022 | 39 |
| Tabla 7. Comparación entre CUS 2022 Observado y 2022 Proyectado | 40 |

CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas la conurbación de las ciudades de Coquimbo y La Serena, ubicadas en la región de Coquimbo, Chile, ha sido testigo de un fenómeno de crecimiento urbano que ha transformado drásticamente el paisaje. Este proceso se caracteriza por una expansión desregularizada que abarca hasta 30 kilómetros alrededor de la conurbación, mediante subdivisión masiva de terrenos rurales, lo que se conoce como loteos suburbanos (Aguirre, *et al.* 2018, Orellana, 2020).

Este crecimiento urbano no solo tiene implicancias locales, sino que también se enmarca en un contexto más amplio de planificación urbana sostenible. La manera en que las ciudades se desarrollan y expanden tiene un impacto significativo en la calidad de vida de sus habitantes y en la preservación de los ecosistemas circundantes. En este sentido, la planificación urbana adecuada se convierte en un elemento esencial para lograr un desarrollo equilibrado que atienda tanto a las necesidades de la población como a las de conservación de los entornos naturales.

Áreas que anteriormente se consideraban inhabitables están experimentando cambios en sus coberturas y usos de suelo, dando forma a una nueva realidad geográfica que se extiende a través de los paisajes, terrenos rurales, tierras de cultivo y áreas de alto valor ecológico están siendo ocupados en este proceso.

Uno de los sectores que ha sido impactado significativamente por esta expansión urbana es El Panul, situado a nueve kilómetros al sur de la ciudad de Coquimbo. Este sector destaca por su importancia ecológica, albergando una biodiversidad de especies nativas y endémicas, de las que resalta *Myrcianthes coquimbensis*, un arbusto tropical relicto en peligro de extinción. Esta especie cuenta con una distribución geográfica regional acotada que se extiende desde la comuna de La Higuera hasta el sur de la ciudad de Coquimbo, preferentemente por los sectores costeros.

En este contexto, esta memoria tiene como objetivo principal comprender y analizar las dinámicas de Cambio de Cobertura y Usos de Suelo (CCUS) en el sector El Panul durante el periodo 2002 – 2022. Además, se busca proyectar la evolución hasta el año 2040 utilizando herramientas de Sistemas de Información Geográfica, teniendo como propósito evaluar el impacto que el crecimiento urbano ha tenido en el ecosistema de matorral costero semiárido y reflexionar sobre la necesidad de conservar la biodiversidad de ese ecosistema.

A lo largo de este estudio, se examinarán los cambios en el paisaje, analizarán las tendencias en el uso de suelo y se explorarán posibles implicaciones que estos cambios puedan tener en la conservación de la flora y fauna locales, buscando ofrecer perspectivas importantes para la toma de decisiones futuras.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad en la región de Coquimbo solo el 0,37% de la superficie corresponde a Áreas Silvestres Protegidas. En este sentido, Benoit (1996) citado en (Cavieres, *et al.*, 2001) sostiene que el “Servicio Nacional de Áreas Protegidas del Estado (SNASPE) adolece de limitaciones producto de la subrepresentación de ecosistemas de desierto y zonas áridas” (p. 168), a pesar de la importancia de estos ecosistemas en ámbitos ecológicos, paisajísticos, ambientales y de la importancia que tienen sobre la continuidad de distintas dinámicas y procesos que ayudan a mantener la estructura y funcionalidad de los paisajes áridos.

Sin lugar a duda, el escenario actual es bastante desalentador, comprendiendo que la región es parte del *Chilean Winter Rainfall-Valdivian Forests* uno de los 36 *hotspots* de biodiversidad descritos a la fecha (CEPF, 2016). Al tratarse de una zona de transición, la región es una de las con mayor riqueza específica del país, y es debido a esta misma especificidad que la extinción de cualquier especie significa una pérdida mayor (Lagos, Torres & Noton, 2001).

Los sectores costeros son los sitios que presentan mayores problemas de conservación y a la vez una mayor concentración de biodiversidad. El sector costero norte de la región, donde se ubican las ciudades de Coquimbo y La Serena es un área que presenta una alta biodiversidad con 477 especies, donde el 22% corresponden a especies con problemas de conservación (Squeo, Arancio, Marticorena, Muñoz & Gutiérrez, 2001).

En este sentido, se han desarrollado estudios donde se señalan diversos sitios prioritarios para la conservación de la diversidad biológica del país. Para la región de Coquimbo (Muñoz, Núñez & Yáñez, 1996; Squeo, Arancio & Cavieres 2001), se propone el sitio prioritario Punta de Teatinos, al norte de La Serena como prioridad urgente, y el sector sur de Coquimbo con prioridad de interés. Cavieres *et al.* (2001) a través de análisis de parsimonia de endemismos (PAE) señala áreas que permitirían “realizar acciones de conservación, ya que presentan una cantidad de endemismo, y optimizan la representación de especies de las áreas mayores a las cuales pertenecen” (p. 164) obteniendo como resultados la necesidad de proteger -entre otros- los sitios previamente señalados.

El sitio que corresponde al sector al sur de Coquimbo presenta una situación de conservación más compleja, ya que, al estar las ciudades de Coquimbo y La Serena, se trata de una zona donde el desarrollo de complejos turísticos costeros está masificado y consolidado, por lo que se tomarían solo medidas puntuales de protección (Squeo, Arancio & Cavieres, 2001).

A pesar de que han transcurrido más de veinte años desde la propuesta de sitios prioritarios aún ninguna de estas áreas se encuentra bajo alguna categoría de conservación, y en este período, las dinámicas de crecimiento urbano no se han detenido, y por consiguiente los cambios en las coberturas y uso de suelo se han visto intensificadas. Son estos cambios en el uso y cobertura de suelo los que han demostrado

el último tiempo los efectos de la intervención sobre los sectores naturales, siendo el reemplazo de estas coberturas por medio de la expansión urbana, un proceso vertiginoso e irreversible (Sandoval, 2009).

A pesar de esto, se actúa sobre la marcha cuando la expansión de la frontera urbana ya se encuentra medianamente consolidada en los nuevos espacios por los que se dispersa.

El sector sur de Coquimbo conocido como El Panul se ha visto afectado por parcelaciones, desarrollo de proyectos inmobiliarios y la venta de terrenos con presencia de lucumillo *Myrcianthes coquimbensis* y guayacán *Porlieria chilensis* (Saldías & Velozo, 2012). La ausencia de planificación territorial y la permisividad que existe actualmente en los instrumentos de planificación ha desencadenado que la frontera urbana de la ciudad de Coquimbo se haya comenzado a extender hacia el sector sur sobre ecosistemas de matorral. Se suma la fuerte presión industrial que se vive en la actualidad con proyectos de desaladoras que buscan instalarse en sectores costeros a lo largo del país, y específicamente en la ensenada El Panul de la región de Coquimbo, proyectos que se presentan como una alternativa, apoyada por la institucionalidad, pero cuestionada ambientalmente, para superar los problemas de escasez hídrica, ponen en una extrema tensión a estos ecosistemas de alto valor ecológico.

Esta pérdida continua de la biodiversidad en las últimas décadas ha ido en aumento producto de la explotación global de recursos naturales de casi la totalidad de los ecosistemas. Debido a lo anterior la humanidad se enfrenta a una crisis socioecológica sin precedentes que podría desencadenar en un inminente colapso (Espinosa, 2019). Este desequilibrio pone en riesgo no solamente la sobrevivencia del ser humano, sino también la de los ecosistemas, como señala McCann (2000) citado en Squeo, Arancio, Marticorena, Muñoz & Gutiérrez (2001): Si la alta biodiversidad favorece la estabilidad ecológica, la acelerada pérdida de especies puede desestabilizar o inclusive llevar al colapso a ecosistemas completos.

Frente a estas dinámicas de expansión urbana y pérdida continua de biodiversidad, se pretende observar cómo se han desarrollado los cambios en la zona costera mencionada mediante un análisis a escala espaciotemporal buscando determinar las variaciones en la cobertura y uso de suelo, sus proyecciones y el efecto del crecimiento urbano, con un enfoque desde el ordenamiento territorial que destaque el alto valor ecológico de dicha zona y la importancia de los ecosistemas semiáridos.

1.3 ESTADO DEL ARTE

1.3.1 Expansión Urbana

Desde hace unas décadas las ciudades latinoamericanas han comenzado a experimentar nuevos paradigmas de crecimiento urbano (Borsdorf, 2003). La frontera comienza a expandirse hacia nuevos lugares que se encontraban alejados de los procesos y dinámicas urbanas. Sitios que por mucho tiempo se consideraban inhabitables, comienzan a ser transformados, estructurando una nueva geografía que comienza a dispersarse por los paisajes, ocupando áreas rurales, terrenos cultivables y zonas de alto valor ecológico.

Estos procesos de expansión hacia áreas naturales y seminaturales vienen amparados en diversas políticas, proyectos, instrumentos de planificación territorial que buscan normalizar la transición hacia nuevos paradigmas de entender los espacios urbanos, promoviendo de manera legal la expansión residencial hacia prácticamente cualquier territorio (Jiménez, Hidalgo, Campesino & Alvarado, 2018).

Estas nuevas maneras de crecimiento urbano y construcción de las ciudades ha implicado la *comodificación* del medio natural, ya que son las áreas naturales las que son destinadas a uso urbano (Romero & Vásquez, 2005) generando importantes pérdidas en los servicios y funciones ambientales de los paisajes, lo que ha provocado una transformación del medio ambiente en un servicio transable en el mercado, incorporándolo al valor final de los proyectos inmobiliarios que se construyen en estas áreas (Romero *et al.*, 2007).

La expansión urbana hacia las áreas naturales provoca la disminución y fragmentación de los hábitats naturales. Los nuevos paisajes antropizados se ven perturbados por nuevas dinámicas, los nuevos bordes que rodean estas áreas fragmentadas pueden inducir cambios en la composición y estructura de las comunidades biológicas al verse afectadas por la matriz circundante, en este sentido es que el grado de especialización, movilidad e interacción que tienen los organismos influye en su respuesta sobre los procesos de urbanización (Concepción, 2022).

1.3.2 Cambios en la cobertura y uso de suelo

Los estudios de cambio en la cobertura y uso de suelo toman gran relevancia en tiempos donde las actividades antrópicas son las responsables de la mayoría de las transformaciones de los ecosistemas terrestres, permitiendo obtener información a distintos niveles de escala y temporalidades, ayudando así a la comprensión de las dinámicas espaciales y procesos ocurridos en un territorio determinado (degradación de suelos, deforestación, fragmentación de ecosistemas, etcétera).

Existen diversos estudios que identifican diversas consecuencias que tiene la expansión de los usos antrópicos del suelo sobre las áreas naturales y/o seminaturales, y sus efectos sobre las funciones sociales y ambientales, o bien sobre los servicios que estos ecosistemas pueden proveer al conjunto de la sociedad.

Se pueden encontrar casos de expansión de la frontera urbana en Chile y sus efectos sobre las dinámicas socioambientales y espaciales en la población del Gran Santiago (Romero *et al.*, 2007), y como esta ha propiciado procesos de *comodificación* de la naturaleza afectando directamente en las formas de cómo se va construyendo y creando ciudad a través de una segregación socio-espacial y socio-ambiental.

En este mismo sentido, Vásquez & Romero (2006) citado en Romero, *et al.* (2007) señalan que se comienzan a generar dinámicas de injusticia ambiental, donde se benefician los sectores de mayores ingresos, producto de que las externalidades negativas que pueden existir en los sistemas urbanos son asumidas por los sectores con menores ingresos de las ciudades, ya los sectores más acomodados son los que tienen el poder adquisitivo de pagar un valor extra por áreas con una mayor presencia de cobertura vegetal, y por lo tanto de mayor valor ecológico.

Otro tipo de trabajos develan los efectos que tiene la expansión de la frontera urbana sobre los ecosistemas de montaña en el sector oriente del Gran Santiago. Pávez, Lobos & Jaksic (2010) dilucidan los efectos de la urbanización sobre el piedemonte andino, donde logran evidenciar un cambio importante en la dinámica del paisaje precordillerano afectando principalmente la calidad del ecosistema de matorral, una disminución de la abundancia y riqueza de aves rapaces, y una disminución de la abundancia de los micromamíferos nativos de mayor tamaño, producto de la fragmentación y pérdida de hábitats naturales.

Para el caso de los micromamíferos, a través de colecta de especies y estudio dietario de aves rapaces (peuco y águila) por medio de egagrópilas, se identifica una tendencia a la disminución de una de las principales presas nativas, el degú *Octodon degus*, sin embargo, existió un aumento en la depredación sobre el conejo europeo *Oryctolagus cuniculus*. Estos resultados aparentemente no demuestran que exista un aumento en la abundancia del conejo europeo, sino, una disminución de la oferta relativa de degú producto del deterioro del matorral esclerófilo, no obstante, demostraría como la modificación del paisaje beneficia a la adaptación y colonización de especies exóticas en desmedro de especies nativas especialistas de hábitats.

Por su parte, Concepción (2022) evidencia el efecto de los patrones de crecimiento urbano sobre los ecosistemas naturales y como, no solamente la superficie urbanizada, sino también la calidad y configuración espacial de estas áreas se relaciona directamente con los cambios en las composiciones y estructuras de las comunidades biológicas, afectando la biodiversidad de los ecosistemas. Por ejemplo, un uso intenso del suelo urbano puede provocar un aumento en las especies de plantas ruderales y aves generalistas comunes, mientras que la proliferación de plantas exóticas se encuentra fuertemente ligado al grado de dispersión de las áreas urbanas.

Smith & Romero (2009), por su parte, dan cuenta de que los efectos de la urbanización también pueden afectar a ecosistemas de transición, como los humedales. Se evidencia como casi la totalidad del sistema urbano del Gran Concepción fue “planificado” sobre estos ecosistemas. A lo largo de los años logran identificar un importante proceso de

reemplazo de la superficie de humedales, en una primera instancia por coberturas vegetales, que más tarde serían transformadas por usos de suelo urbano.

Lo anterior ha provocado importantes procesos de degradación, fragmentación y reducción de los ecosistemas de transición, afectando de manera directa la red de drenajes que componían al Gran Concepción, generando pérdidas importantes sobre áreas de *alta calidad ambiental* que presentaban estos ecosistemas.

En el caso de ecosistemas semiáridos, Leija *et al.* (2020) demuestran los impactos de la expansión de los asentamientos urbanos y agrícolas sobre la cuenca baja del río Nazas en México. La superficie original de la cuenca ha ido siendo reemplazada principalmente por uso agrícola afectando de manera directa a los ecosistemas de matorral xerófilo y bosque de galería.

Se evidencia una pérdida relevante de la vegetación y fauna asociada a los matorrales xerofíticos, lo que se traduce en una disminución de los hábitats e impactos en la conservación de asociaciones vegetales, importantes para mantener el equilibrio en los ecosistemas y en los nichos ecológicos claves para diversas especies.

La deforestación del bosque de galería puede significar un incremento de la temperatura en el curso de agua, un posible aumento de la evaporación, una baja en los niveles de oxígeno disuelto y una disminución en la oferta de nutrientes para los organismos hidrobiológicos, y con ello la afectación del hábitat para dichos organismos, lo que aumentaría aún más los efectos que ha tenido la presión antrópica producto del incremento de la demanda hídrica para diferentes usos sobre el ciclo hidrológico.

1.3.3 Ecosistemas semiáridos

La necesidad de la especie humana por comprender y entender el espacio que habita ha llevado a investigadores relacionados con los estudios geográficos a desarrollar diversos índices que permitan agrupar a los ecosistemas bajo ciertas características bioclimáticas (ej. Köppen, Thornthwaite).

Para el caso de ecosistemas de tierras secas (seco subhúmedo, semiárido, árido e hiperárido) no es la excepción y se definen a partir de un índice que refleja el grado de aridez, el que se encuentra dado por la proporción que existe entre la precipitación y la evapotranspiración potencial (Martínez-Valderrama, Guirado & Maestre, 2021). Para el caso particular de los ecosistemas áridos y semiáridos, corresponden aquellos donde el grado de aridez es inferior a 0,5. Dichos ecosistemas representan un tercio de la superficie terrestre (Pointing & Belnap, 2012).

Una de las características principales de los ecosistemas semiáridos, es que se ven afectados por períodos de baja precipitación, lo que, sumado a periodos prolongados de sequía, ha llevado a que sus comunidades vegetales hayan desarrollado diversas estrategias que han permitido mantener el estado funcional de estos ambientes, mediante diversos mecanismos de interacción entre las comunidades presentes en el ecosistema

con la finalidad de sobreponerse a los periodos de estrés hídrico (Martínez & Pugnaire, 2009).

Entre estas estrategias destaca la distribución y organización espacial de las comunidades vegetales en los ecosistemas de tierras secas, las cuales se encuentran distribuidas espacialmente de manera heterogénea sobre el paisaje, bajo patrones en mosaico bifásico, como si se encontraran frente a un proceso de fragmentación. Estos ecosistemas se encuentran compuestos por una matriz de baja cobertura vegetal y parches con presencia de una alta cobertura; las áreas de alta cobertura vegetal suelen estar dominadas por comunidades leñosas. La distribución de las comunidades puede ser de dos tipos (Fig. 1.), que son conocidas bajo el nombre de “tigre” (a) o “leopardo” (b). Para el caso particular del matorral chileno se suele observar espacialmente un patrón en forma de manchas o “leopardo”. (Aguiar & Sala, 1999).

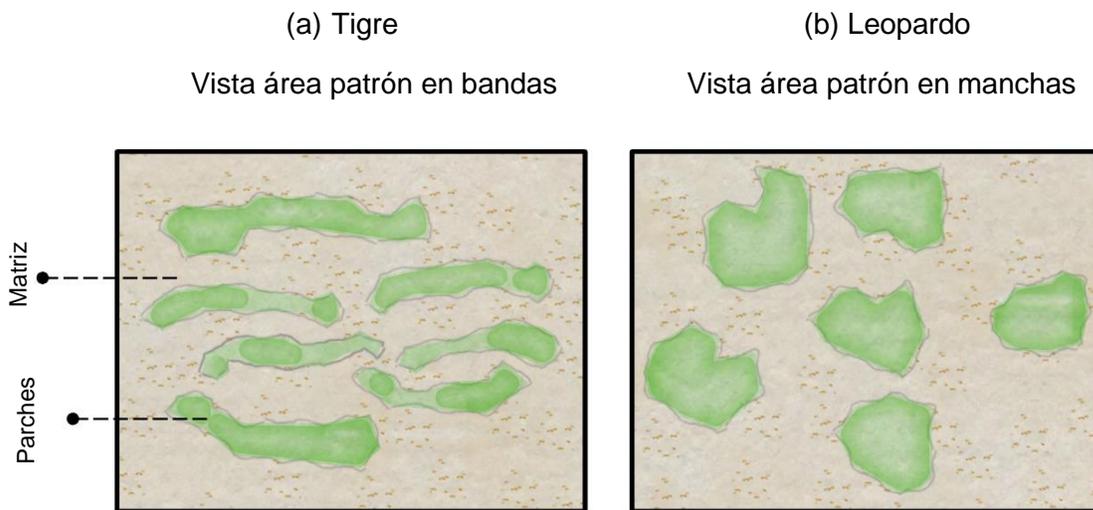


Fig. 1. Tipos de distribución espacial en paisajes áridos y semiáridos. Ejemplo de estructura vegetal en mosaico, parches que contienen presencia de una alta cobertura vegetal, en matriz de baja cobertura. Patrón en bandas o tigre (a) y patrón en manchas o leopardo (b).

Elaboración propia en base a Aguiar & Sala (1999).

La distribución heterogénea de los paisajes de tierras secas y su singular distribución en mosaicos bifásicos afecta las tasas de varios procesos que ocurren en el ecosistema, desde las dinámicas del agua, ciclo de nutrientes y las interacciones bióticas. Tomando como ejemplo los paisajes que poseen una distribución en manchas o leopardo, en las áreas con mayor densidad de vegetación poseen una mayor capacidad de infiltración de agua y una menor evaporación, en comparación con la matriz circundante dominada por una baja cobertura (Aguiar & Sala, 1999).

En relación con los ciclos de nutrientes, en estos ecosistemas es característico encontrar “islas de fertilidad” en sectores donde las comunidades leñosas son abundantes. Estas islas se encuentran impulsadas por procesos bióticos y abióticos, como, por ejemplo, la acumulación de materia orgánica bajo matorrales xerofíticos producto de la acumulación

de hojarasca o la redistribución de recursos mediante procesos de dispersión por agua o el viento. El conjunto de estas dinámicas, permiten el almacenamiento de diversos nutrientes como el nitrógeno (Aguiar & Sala, 1999; Gutiérrez & Squeo, 2004).

Entendiendo que los ecosistemas de tierras secas poseen una menor resiliencia, tanto a las presiones naturales como antrópicas (Gunderson, 2000) es que el mantenimiento del equilibrio es esencial para la continuidad de la estructura y procesos que se desarrollan en el ecosistema. La vegetación cumple un rol fundamental para estos fines, como reducir los efectos de la erosión por salpicadura o en el aumento de la captación de agua y continuidad del ciclo hidrológico (Belmonte & Romero, 1998).

Los árboles y arbustos leñosos de los ecosistemas semiáridos mediante sus raíces pivotantes facilitan la continuidad del ciclo hidrológico por medio del levantamiento hidráulico desde las capas freáticas, además ayudan en la redistribución de nutrientes presentes en el suelo. Esto ha permitido mantener las interacciones bióticas planta-planta entre las comunidades que componen el ecosistema permitiendo la sobrevivencia en periodos largos de sequía y en época estival a especies con un sistema radicular superficial (Gutiérrez & Squeo, 2004).

Otra interacción biótica que suele ocurrir en los ambientes de características áridas y semiáridas es la asociación entre plantas que ayudan a mantener la estructura de las comunidades leñosas conocida como efecto nodriza, permitiendo a la vegetación más madura poder persistir y rejuvenecerse por medio del establecimiento de nuevas plántulas bajo su dosel, que no lo hacen a campo abierto o se les hace muy difícil ante las elevadas temperaturas, la radiación y la baja humedad atmosférica. La vegetación madura también ayuda a la sobrevivencia de flora y fauna proporcionando refugio frente a depredadores, y aportando nutrientes a hierbas anuales formando asociaciones mutualistas (Gutiérrez & Squeo, 2004; Rosa-Mera & Monroy-Ata, 2006).

1.3.4 Territorio

El concepto de ordenamiento territorial ha tomado distintos matices y definiciones a lo largo de los años los cuales suelen responder a diferentes contextos socioculturales, económicos, ambientales y territoriales específicos.

Para adentrarse en estas definiciones resulta necesario en primera instancia definir el concepto de territorio, lo que permitirá una mejor comprensión de lo que es la ordenación territorial.

Raffestin (2011) en su texto por *una geografía del poder*, define el concepto de territorio como el resultado de acciones desarrolladas por la interrelación de los actores sobre el espacio, al apropiarse concreta o abstractamente de él es "territorializado", de tal forma que el territorio es la producción social del espacio en el cual se revelan relaciones de poder.

Bajo una perspectiva similar Santos (1999) señala que el territorio debe comprenderse como un *territorio usado*, es decir, no es un espacio inerte donde se yuxtaponen los

sistemas naturales y la vida humana. El *territorio usado* es el *suelo* más la *identidad*, donde la *identidad* es el sentimiento de pertenencia de lo que nos pertenece. El territorio por lo tanto es donde se desarrolla el ejercicio de la vida.

Ambos autores señalan la necesidad de comprender el territorio como un espacio que es utilizado, donde se desenvuelven las interrelaciones sociales que van produciendo territorio, por lo tanto, el territorio no es un “*algo*” inerte, las relaciones humano-ambientales que se desenvuelven en el espacio lo dotan de movilidad y cambio, es un ir y venir de transformación constante.

Esta concepción de territorio se refuerza con lo señalado por Gross (1998) donde sostiene que el territorio debe ser analizado y comprendido desde una visión histórica, ya que es aquí donde se han ido desarrollando las acciones del pasado, se muestran las tendencias, permitiendo observar la realidad concreta en la que nos movemos como sociedad, además de entender su temporalidad, lo que permitirá tener visiones de largo alcance.

En esta línea Folchi (2001) a través del estudio histórico de la industria del cobre en Chile durante el siglo XIX analiza como el espacio geográfico se ha ido transformando y reestructurando, donde demuestra que los antiguos paisajes del norte semiárido eran verdaderos verdegales que sufrieron una dramática disminución de su cubierta vegetal producto de una explotación sistemática del paisaje, de esta forma también se ha perpetuado una construcción simbólica del espacio a través de la idea de “desierto”.

Por lo tanto, el territorio puede ser entendido como un entramado de redes complejas y variables en el tiempo, que se ve afectado tanto por procesos geoclimáticos como socioculturales. En él se desarrollan diversas actividades de carácter productivo, socioculturales y/o ambientales. La necesidad de aunar, organizar y compatibilizar la heterogeneidad que se desenvuelve en el espacio físico da como origen al desarrollo de estrategias de ordenación territorial.

1.3.5 Ordenamiento Territorial

Desde las concepciones más clásicas del término, la Carta Europea de Ordenación del Territorio (1983) intenta integrar un enfoque interdisciplinario a la ordenación del territorio, definiéndolo como una “disciplina científica, técnica administrativa y una política concebida como un enfoque interdisciplinario y global cuyo objetivo es un desarrollo equilibrado de las regiones y organización física del espacio”.

En la Política Nacional de Ordenamiento Territorial (PNOT) de Chile publicada el año 2021, se identifican diversas estrategias, objetivos y lineamientos a seguir para el desarrollo armónico del espacio. En esta Política es entendido el ordenamiento territorial de la siguiente manera:

“Proceso técnico-político que orienta la toma de decisiones para la organización y expresión espacial de una visión de desarrollo país, permitiendo: la definición y orientación de la ocupación del territorio con su organización temporal y espacial; y la definición de un conjunto de reglas y orientaciones para compatibilizar la relación entre desarrollo

económico, social y ambiental; junto con propiciar la articulación entre políticas, planes y programas”.

Massiris (2002) luego de haber realizado un análisis de las políticas de ordenamiento territorial de quince países latinoamericanos, señala que para el caso de Chile y al igual que otros de la región, la ordenación del territorio nace y se encuentra fuertemente ligada a la planificación urbana, siendo su principal soporte la Ley General de Urbanismo y Construcciones (LGUC) y la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC).

Espinoza (2019) refuerza esta idea al señalar que el ordenamiento territorial en Chile se realiza mediante la aplicación de diferentes Instrumentos de Planificación Territorial (IPT), debido a que no existe una ley marco o legislación específica para la ordenación del territorio, sino, legislaciones que lo abordan desde la planificación urbana mediante los IPT de carácter normativo.

A esta misma idea, Espinoza (2019) añade que la principal problemática de los IPT es que no promueven el desarrollo sostenible del espacio, producto de que existe una superposición de las actividades según los requerimientos del modelo económico al momento de realizar la zonificación de uso de suelo. Lo anterior demostraría una inconsistencia y debilidad en el marco jurídico encargado de evaluar el impacto ambiental de los instrumentos, lo que se traduce en muchos casos en una degradación y deterioro del medio ambiente como también en la exposición de la población a diferentes amenazas de desastres naturales, contaminación y fragilidad ecosistémica.

Massiris (2002) ya señalaba que a nivel regional existe un estado incipiente de desarrollo de las políticas de ordenamiento territorial, y, por lo tanto, una desarticulada gestión del territorio. El autor identifica las siguientes problemáticas:

1. Poca claridad con respecto a los mecanismos que actúan dentro del ordenamiento territorial.
2. En países latinoamericanos sin respaldo legal propio, se manifiesta una debilidad normativa de la práctica de la ordenación del territorio.
3. No hay una organización administrativa que gestione de manera integral, global y horizontal.
4. Participación social en los procesos de ordenación territorial débil, prevalece la visión de instituciones de Gobierno y de grupos empresariales.
5. La mayoría de los países latinoamericanos carecen de sistemas nacionales de producción de información territorial que articulen a las distintas instituciones para la elaboración de planes de ordenamiento territorial.

Más de dos décadas luego de la identificación de estas problemáticas, Quinteros (2018) analizando los Planes Reguladores Comunes (PRC) señala que los enfoques técnico-urbanísticos han homogenizado la práctica de la ordenación y planificación territorial,

donde ya deberían existir nuevas herramientas metodológicas de carácter participativo, inclusión social y el ejercicio democrático en el diseño del territorio.

En resumen, Ferrol (1986) señala que la ordenación del territorio es un proceso dual que cuenta con una reflexión científica acerca de las complejas dinámicas que ocurren en el espacio social, sumado a una actuación normativa que se encuentra basada en estas reflexiones. La Ordenación del Territorio debe contribuir a la coexistencia armoniosa del humano con la Naturaleza.

1.3.6 Modelos de cambio de uso de suelo

Como ya ha sido mencionado en los ejes anteriores, uno de los principales agentes de conversión de las coberturas y uso de suelo es la actividad antrópica, muchas veces afectando de manera irreversible áreas naturales y/o seminaturales de alto valor ecológico.

La expansión de la frontera urbana y la localización de actividades productivas en el territorio han sido los principales motores de cambio de uso del suelo. El problema principal radica en que en la mayoría de los casos existe una deficiencia de estrategias de planificación y/o ordenamiento territorial, debilidad normativa, problemas de intereses o inclusive una permisividad en la especulación sobre el uso de la tierra.

En este sentido los modelos de proyección de cambios de cobertura y uso de suelo son una herramienta útil que permite observar a escala multitemporal las dinámicas de transición espacial que pudiesen ocurrir en un territorio determinado, ayudando a prever efectos adversos sobre los ecosistemas terrestres o facilitando la implementación y el desarrollo de planes y estrategias de planificación y ordenación del territorio que respete una coexistencia humano-naturaleza.

Henríquez *et al.* (2006) citado en Sandoval (2009) refuerza esta idea al señalar la potencialidad de los modelos de predicción al ser capaces de representar la magnitud de los cambios, localizaciones futuras y patrones espaciales.

Para Lambin (1997) las investigaciones sobre procesos de cambio de uso de suelo deben responder al menos una de las siguientes preguntas: ¿Qué variables medioambientales y culturales contribuyen a explicar los cambios en el uso de suelo? ¿Qué lugares se ven más afectados? ¿A qué ritmo se producen los cambios?

Además, sostiene que la mejor manera de responder estas interrogantes es a través de observaciones directas del pasado y por medio de modelos de predicción para situaciones futuras o del pasado lejano, mediante la aplicación de una metodología que se adapte a la investigación que se quiere desarrollar.

Para el estudio de proyecciones de cambio de cobertura y uso de suelo, Lambin (1997) propone la utilización de una metodología basada en la aplicación de modelos de probabilidad de transición espacial y/o análisis de series de tiempo, para este tipo de estudios señala dos posibles técnicas, una de carácter estocástica y otra basada en funciones logísticas.

Los modelos de probabilidad de transición espacial utilizan principalmente las técnicas estocásticas como *cadena de Markov* y *autómatas celulares* (Paeglow, Camancho-Olmedo & Toribio, 2003; Sandoval, 2009; Sang, Zhang, Yang, Zhu & Yun, 2011; Reynoso, Valdez, Escalona, & Pérez, 2016).

Las cadenas de Markov resulta una herramienta útil al presentar grandes ventajas para el estudio de cambios de cobertura y uso de suelo. Al determinar las dinámicas que se producen en el territorio puede ayudar a generar propuestas de zonificación de usos y actividades permisibles, ayudando a la ordenación y planificación del territorio (Briceño, 2005).

Sin embargo, tiene algunas desventajas al presentar dificultad para predecir los patrones espaciales en los cambios de cobertura y uso de suelo. Por otra parte, los modelos de transición espacial que utilizan autómatas celulares son capaces de simular de manera eficaz las variaciones espaciales del sistema y su evolución dinámica espacio-temporal (Sang, *et al.* 2011).

Para entregar mayor robustez y solidez para la predicción de cambio de cobertura y uso de suelo, el modelo CA-Markov incorpora ambas teorías obteniendo mejores resultados con respecto a la simulación de los patrones espaciales y temporales al agregar variables explicativas de carácter natural o social (Paeglow *et al.*, 2003; Sandoval, 2009; Sang *et al.* 2011, Reynoso *et al.*, 2016). Este modelo se ha comenzado a utilizar cada vez más para predecir diferentes problemas espaciales de carácter dinámico como lo es el crecimiento urbano y los cambios futuros en la cobertura y uso de suelo, al aprovechar las ventajas de predicción cuantitativa de las cadenas de Markov y el fuerte componente espacial de autómatas celulares (Aburas, Ho, Ramli, Ashaari, & S. Ahamad, 2018).

Otros modelos de predicción son los basados en *redes neuronales artificiales* los cuales buscan y reconocen patrones repetitivos durante una secuencia temporal, lo que originó que se comenzaran a emplear en la modelación de las dinámicas espacio-temporales de los cambios de uso de suelo (Díaz-Pacheco & Hewitt, 2013). Estos modelos han tomado gran notoriedad, sobre todo los de tipo *Preceptrón multicapa* (MLP por sus siglas en inglés) los cuales permiten modelar transiciones múltiples en base a los píxeles que han experimentado transición o no, a través de un piloto de aprendizaje automático (Mahecha & Lugo, 2019).

1.4 ÁREA DE ESTUDIO

La conurbación de las ciudades Coquimbo – La Serena desde hace unas décadas que ha comenzado a presentar un crecimiento sostenido, siendo la cuarta área metropolitana más poblada del país. Las tendencias recientes de crecimiento urbano demuestran un comportamiento errático caracterizado por una parcelación masiva de los terrenos rurales entorno a la conurbación en un radio de hasta 30 kilómetros, mediante loteos suburbanos.

Dichos loteos que en un principio se encontraban adyacentes al límite urbano, ahora están configurando una ciudad extendida. Este proceso de conurbación tuvo su origen en procesos de urbanización, formales e informales, separados de los núcleos urbanos ya consolidados, los cuales en un comienzo no presentaban continuidad dando origen a una estructura suburbana fragmentada, generando un proceso de metropolización en base a fragmentos. La continuidad actual de la conurbación es producto de un crecimiento hacia adentro que comenzó llenando espacios vacíos de la matriz urbana, mediante la superposición y yuxtaposición de instrumentos hasta que se consolida una unidad normativa. El crecimiento actual de la ciudad de Coquimbo se concentra en el puerto ampliándose hacia el sur (Aguirre *et al.*, 2018; Orellana, 2020).

Actualmente en el sector El Panul se observa un tipo de crecimiento basado en la parcelación de terrenos rurales (Fig. 2.) señalados por Orellana (2020), con presencia de proyectos inmobiliarios y ventas de terrenos desde los 500 m² que ponen en riesgo el hábitat de distintas especies de flora y fauna.



Fig. 2. Se muestran algunas de las parcelaciones que se encuentran en venta y la publicidad de una constructora en el sector El Panul, lugar donde ha comenzado a expandirse la ciudad de Coquimbo por medio de procesos de loteos suburbanos. Colección personal, 2023.

El clima predominante de la región de Coquimbo es de transición entre un clima mediterráneo árido y semiárido. La zona costera se caracteriza por la presencia de una alta humedad alcanzando niveles de hasta un 85% y mucha nubosidad con temperaturas moderadas. Presenta una tasa de precipitación anual cercana a los 80 milímetros, concentrada entre los meses de mayo – agosto (Nova & López, 2001), además de períodos de variación interanual de las precipitaciones producidas por El Niño (Loayza *et al.* 2014) sumado a la acción constante de los vientos sur y suroeste que permiten mantener la continuidad del ciclo hidrológico de los ecosistemas de matorral semiárido durante todo el año al propiciar el ingreso al continente de nieblas costeras que ayudan a mantener las condiciones de humedad (Escobar & García, 2017).

El área de estudio en donde se desarrolla la investigación corresponde al sector El Panul (Fig. 3), ubicado a nueve kilómetros al sur de la ciudad de Coquimbo, aproximadamente. Se caracteriza por contar con distintas ensenadas y formaciones rocosas (Fig. 4) que albergan una importante cantidad de flora y fauna nativas y endémicas en distintos estados de conservación, con predominio del matorral costero semiárido.

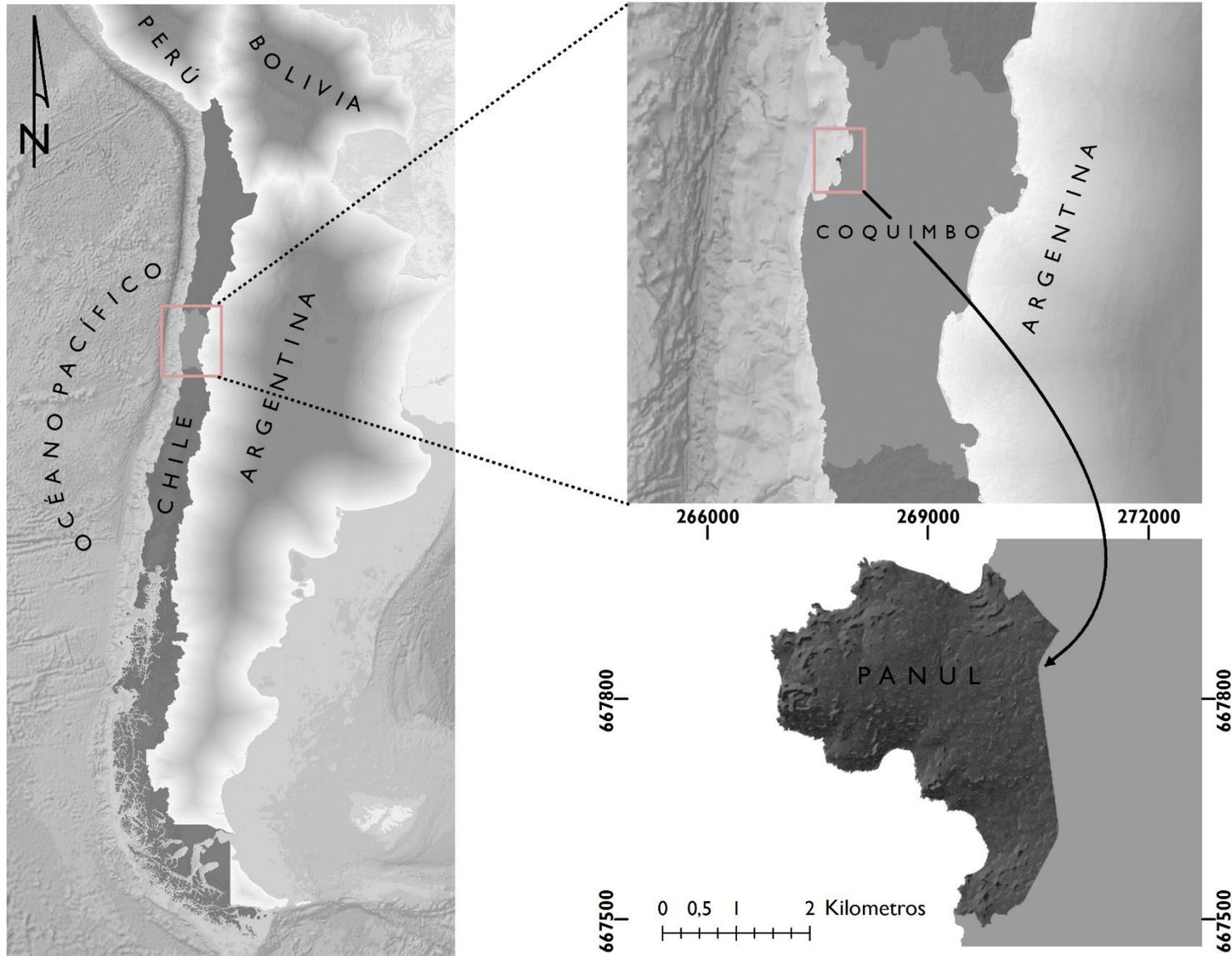


Fig. 3. Cartografía Área de Estudio, localización "El Panul".

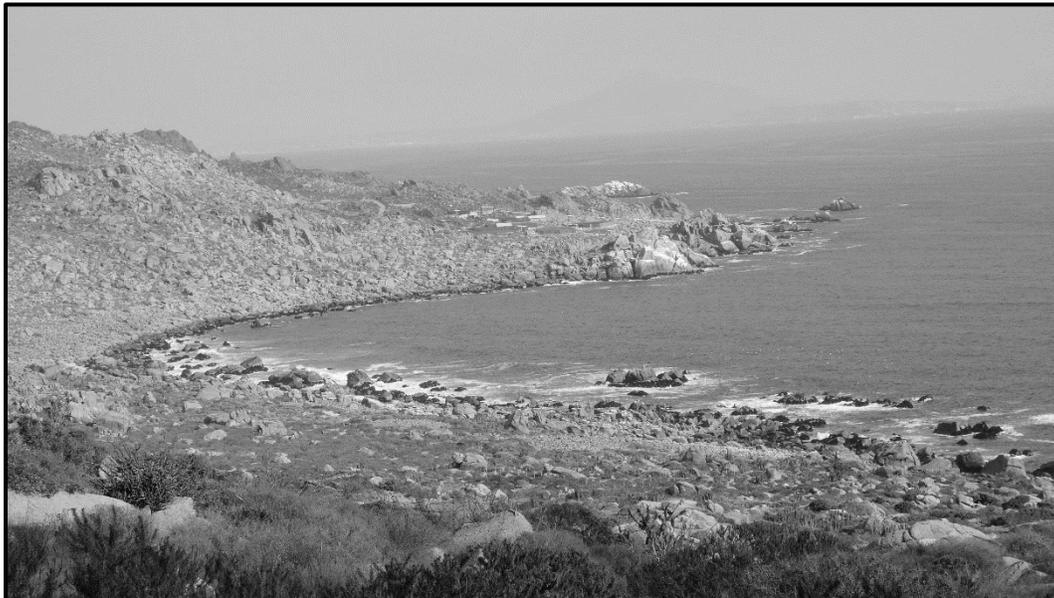


Fig. 4. Vista panorámica de la ensenada El Panul y su ambiente rocoso en asociación con matorral costero. El sector cuenta con sitios arqueológicos y presencia de flora y fauna en categorías de conservación. Colección personal, 2023.

El Panul se encuentra dentro del piso vegetacional de *matorral desértico mediterráneo costero* y entre sus especies predominantes se encuentran *Oxalis virgosa* y *Heliotropium stenophyllum* según Luebert & Pliscoff (2017). Además presenta una predominancia de poblaciones de lucumillo, *Myrcianthes coquimbensis*, arbusto tropical relicto en peligro de extinción. Estas poblaciones están restringidas a un área geográfica acotada de 83,7 km que se extiende desde la comuna de La Higuera pasando por la ciudad de Coquimbo, hasta el sur del complejo turístico Las Tacas. Además, se han identificado formaciones azonales asociadas principalmente a quebradas, alcanzando altitudes de hasta 500 metros sobre el nivel del mar (Ibáñez & Sandoval, datos no publicados).

En el marco de la actualización del Plan de Recuperación, Conservación y Gestión (RECOGE) del lucumillo, *Myrcianthes coquimbensis*, Ibáñez & Sandoval (datos no publicados) identifican a partir del levantamiento de datos por medio de parcelas de muestreo en el sector El Panul (Tabla 1) para el mes de enero del año 2023 diferentes especies de flora que habitan en asociación con *Myrcianthes coquimbensis* (Tabla 2 y 3), donde es posible observar una variación en la composición florística de las especies, siendo la altitud, época de muestreo y posiblemente el grado de intervención antrópica los factores más determinantes.

| Localidad | Ubicación Parcela | Latitud | Longitud | Exposición | Altitud |
|-----------|-------------------|---------|----------|------------------|----------|
| El Panul | Punta Tacho | -29.99 | -71.40 | Norte - Noroeste | 16 msnm |
| El Panul | Ensenada Panul | -30.01 | -71.38 | Sur | 108 msnm |

Tabla 1. Localización parcelas de muestreo, sector El Panul, elaboración propia en base a información entregada por Ibáñez & Sandoval (datos no publicados), 2023.

| ID | Familia | Género | Especie | Origen |
|----|------------------|----------------------|---------------------|-------------|
| 1 | Alstromeriaceae | <i>Alstroemeria</i> | <i>sp.</i> | endémica |
| 2 | Amaryllidaceae | <i>Leucocoryne</i> | <i>sp.</i> | endémica |
| 3 | Anacardiaceae | <i>Lithrea</i> | <i>caustica</i> | endémica |
| 4 | Apiaceae | <i>Eryngium</i> | <i>coquimbanum</i> | endémica |
| 5 | Aristolochiaceae | <i>Aristolochia</i> | <i>chilensis</i> | endémica |
| 6 | Asteraceae | <i>Haplopappus</i> | <i>coquimbensis</i> | endémica |
| 7 | Asteraceae | <i>Hypochaeris</i> | <i>scorzoneræ</i> | endémica |
| 8 | Asteraceae | <i>Bahia</i> | <i>ambrosioides</i> | endémica |
| 9 | Asteraceae | <i>Haplopappus</i> | <i>parvifolius</i> | endémica |
| 10 | Asteraceae | <i>Centaurea</i> | <i>sp.</i> | endémica |
| 11 | Boraginaceae | <i>Chorizanthe</i> | <i>glabrescens</i> | endémica |
| 12 | Bromeliaceae | <i>Puya</i> | <i>alpestris</i> | endémica |
| 13 | Bromeliaceae | <i>Puya</i> | <i>venusta</i> | endémica |
| 14 | Cactaceae | <i>Copiapoa</i> | <i>coquimbana</i> | endémica |
| 15 | Cactaceae | <i>Eulychnia</i> | <i>breviflora</i> | endémica |
| 16 | Cactaceae | <i>Leucostele</i> | <i>pectinifera</i> | endémica |
| 17 | Caryophyllaceae | <i>Spergularia</i> | <i>floribunda</i> | endémica |
| 18 | Ephedraceae | <i>Ephedra</i> | <i>gracilis</i> | endémica |
| 19 | Fabaceae | <i>Adesmia</i> | <i>filifolia</i> | endémica |
| 20 | Fabaceae | <i>Erythrostemon</i> | <i>angulatus</i> | endémica |
| 21 | Heliotropiaceae | <i>Heliotropium</i> | <i>stenophyllum</i> | endémica |
| 22 | Montiaceae | <i>Cistanthe</i> | <i>vicina</i> | endémica |
| 23 | Montiaceae | <i>Cistanthe</i> | <i>grandiflora</i> | endémica |
| 24 | Myrtaceae | <i>Myrcianthes</i> | <i>coquimbensis</i> | endémica |
| 25 | Oxalidaceae | <i>Oxalis</i> | <i>virgosa</i> | endémica |
| 26 | Plantaginaceae | <i>Plantago</i> | <i>litorea</i> | endémica |
| 27 | Sapindaceae | <i>Bridgesia</i> | <i>incisifolia</i> | endémica |
| 28 | Tecophilaeaceae | <i>Conanthera</i> | <i>campanulata</i> | endémica |
| 29 | Asparagaceae | <i>Oziroë</i> | <i>biflora</i> | nativa |
| 30 | Asphodelaceae | <i>Pasithea</i> | <i>caerulea</i> | nativa |
| 31 | Asteraceae | <i>Helenium</i> | <i>aromaticum</i> | nativa |
| 32 | Fabaceae | <i>Lupinus</i> | <i>microcarpus</i> | nativa |
| 33 | Frankeniaceae | <i>Frankenia</i> | <i>chilensis</i> | nativa |
| 34 | Passifloraceae | <i>Malesherbia</i> | <i>humilis</i> | nativa |
| 35 | Schoepfiaceae | <i>Quinchamalium</i> | <i>chilense</i> | nativa |
| 36 | Asteraceae | <i>Chaetanthera</i> | <i>sp.</i> | indet. |
| 37 | Boraginaceae | <i>Cryptantha</i> | <i>sp.</i> | indet. |
| 38 | Convolvulaceae | <i>Cuscuta</i> | <i>sp.</i> | indet. |
| 39 | Dioscoreaceae | <i>Dioscorea</i> | <i>sp.</i> | indet. |
| 40 | Dioscoreaceae | <i>Dioscorea</i> | <i>sp.</i> | indet. |
| 41 | Euphorbiaceae | <i>Euphorbia</i> | <i>sp.</i> | indet. |
| 42 | Euphorbiaceae | <i>Chiropetalum</i> | <i>sp.</i> | indet. |
| 43 | Linaceae | <i>Linum</i> | <i>sp.</i> | indet. |
| 44 | Poaceae | <i>Nassella</i> | <i>sp.</i> | indet. |
| 45 | Caryophyllaceae | <i>Silene</i> | <i>gallica</i> | introducida |
| 46 | Fabaceae | <i>Melilotus</i> | <i>albus</i> | introducida |

Tabla 2. Especies presentes dentro y fuera de parcela de muestreo “Punta Tacho”, localidad El Panul. Altitud: 16 msnm; Exposición: Norte-Noroeste; Tendencia: Estable. **Nota:** indet. hace referencia a indeterminado. Realizado a partir de los datos proporcionados por Ibáñez & Sandoval, 2023.

| ID | Familia | Género | Especie | Origen |
|----|------------------|---------------------|---------------------|-------------|
| 1 | Alstroemeriaceae | <i>Alstroemeria</i> | <i>magnifica</i> | endémica |
| 2 | Amaryllidaceae | <i>Gethyum</i> | <i>cuspidata</i> | endémica |
| 3 | Amaryllidaceae | <i>Rhodopiala</i> | <i>sp.</i> | endémica |
| 4 | Aristolochiaceae | <i>Aristolochia</i> | <i>chilensis</i> | endémica |
| 5 | Asteraceae | <i>Bahia</i> | <i>ambrosioides</i> | endémica |
| 6 | Asteraceae | <i>Baccharis</i> | <i>paniculata</i> | endémica |
| 7 | Asteraceae | <i>Gutierrezia</i> | <i>resinosa</i> | endémica |
| 8 | Asteraceae | <i>Chaetanthera</i> | <i>albiflora</i> | endémica |
| 9 | Asteraceae | <i>Haplopappus</i> | <i>parvifolius</i> | endémica |
| 10 | Cactaceae | <i>Eulychnia</i> | <i>breviflora</i> | endémica |
| 11 | Fabaceae | <i>Senna</i> | <i>cumingii</i> | endémica |
| 12 | Heliotropiaceae | <i>Heliotropium</i> | <i>stenophyllum</i> | endémica |
| 13 | Myrtaceae | <i>Myrcianthes</i> | <i>coquimbensis</i> | endémica |
| 14 | Onagraceae | <i>Fuchsia</i> | <i>lycioides</i> | endémica |
| 15 | Oxalidaceae | <i>Oxalis</i> | <i>virgosa</i> | endémica |
| 16 | Phytolaccaceae | <i>Anisomeria</i> | <i>littoralis</i> | endémica |
| 17 | Plantaginaceae | <i>Plantago</i> | <i>litorea</i> | endémica |
| 18 | Poaceae | <i>Jarava</i> | <i>tortuosa</i> | endémica |
| 19 | Cucurbitaceae | <i>Sicyos</i> | <i>baderoa</i> | nativa |
| 20 | Loasaceae | <i>Loasa</i> | <i>tricolor</i> | nativa |
| 21 | Passifloraceae | <i>Malesherbia</i> | <i>sp.</i> | nativa |
| 22 | Dioscoreaceae | <i>Dioscorea</i> | <i>sp.</i> | indet. |
| 23 | Dioscoreaceae | <i>Dioscorea</i> | <i>sp.</i> | indet. |
| 24 | Boraginaceae | <i>Cryptantha</i> | <i>sp.</i> | indet. |
| 25 | Euphorbiaceae | <i>Chiropetalum</i> | <i>sp.</i> | indet. |
| 26 | Poaceae | <i>Nassella</i> | <i>sp.</i> | indet. |
| 27 | Poaceae | <i>Polypogon</i> | <i>viridis</i> | introducida |
| 28 | Poaceae | <i>Avena</i> | <i>sp.</i> | introducida |

Tabla 3. Especies presentes dentro y fuera de parcela de muestreo “Ensenada Panul”, localidad El Panul. Altitud: 108 msnm; Exposición: Sur; Tendencia: Degradación; Agentes: Caminos – Desechos domiciliarios. **Nota:** indet. hace referencia a indeterminado; indeterminado. Realizado a partir de los datos proporcionados por Ibáñez & Sandoval, 2023.

1.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1 Objetivo General:

Analizar los procesos de cambio de uso y cobertura de suelo en el sector El Panul en el período 2002 - 2022 y proyectar su evolución para el año 2040.

1.5.2 Objetivos Específicos:

1. Analizar la evolución de los cambios espaciales en la cobertura y uso del suelo en el sector El Panul durante el periodo 2002 - 2022 con énfasis en el matorral costero semiárido.
2. Analizar las proyecciones futuras de cambio en la cobertura y uso del suelo en el sector El Panul para el año 2040.
3. Reflexionar sobre la importancia del sector El Panul para la conservación de la biodiversidad del matorral costero semiárido, considerando los resultados obtenidos en cuanto a los cambios de uso y cobertura del suelo y su posible impacto en el ecosistema y la fauna asociada.

CAPITULO 2: PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

2.1 MARCO METODOLÓGICO

En la siguiente sección se busca proporcionar una descripción de las técnicas, herramientas y procedimientos que se realizaron para dar respuesta a los objetivos planteados en la presente memoria.

Para este trabajo se adoptó principalmente un enfoque de carácter cuantitativo, y en menor medida se utilizaron algunas herramientas de metodologías cualitativas para la recolección de información primaria en el sector, donde se buscó profundizar en las dinámicas socioespaciales y socioambientales de los procesos de urbanización que afectan al ecosistema de matorral costero semiárido en el sector El Panul.

A continuación, se describen los métodos que fueron utilizados para el desarrollo de cada uno de los objetivos específicos.

Para lograr identificar la evolución de los cambios de cobertura y uso de suelo, se procedió a descargar imágenes satelitales desde el Servicio Geológico de Estados Unidos (*USGS Earth Explorer*) para los años 2002, 2013 y 2022 (Tabla 4) cada una de ellas correspondientes a la Colección 2 Nivel 2 (*C2-L2*) de los sensores Landsat, imágenes que ya cuentan con procesamientos a nivel atmosférico, topográfico y radiométrico.

| Sensor | Fecha de imagen | Estación |
|------------------|--------------------|----------|
| Landsat OLI/TIRS | 18 de agosto, 2022 | invierno |
| Landsat ETM + | 29 de mayo, 2013 | otoño |
| Landsat ETM + | 7 de julio, 2002 | invierno |

Tabla 4. Características de las imágenes satelitales descargas desde USGS, 2023.

Las imágenes satelitales adquiridas corresponden a época otoñal e invernal, en fechas donde no había presencia de nubosidad para el área de estudio. Además, se establecieron meses cercanos a periodos de precipitación, buscando que las condiciones de humedad del área de estudio fueran óptimas para facilitar la identificación de los patrones de distribución de las especies de matorral, esto, debido a las adaptaciones y estrategias de las plantas en periodos de déficit hídrico, donde el cierre de sus estomas para evitar pérdida de agua por medio de evapotranspiración, podría generar una reducción de la actividad fotosintética, y por lo tanto de la superficie expuesta al sensor (P. Muñoz, 2013; Sánchez-Díaz & Aguirreolea, 2013; Azcón-Bieto et al. 2013).

Para el año 2002, se registró una precipitación acumulada de 77,6 milímetros entre los meses de mayo-junio¹; 2013 registró una precipitación de 68,6 milímetros para el mes de mayo y de 94,8 milímetros para el mes de julio del año 2022.²

El primer acercamiento para identificar los tipos de cobertura y usos de suelo presentes en el sector El Panul al año 2022, se realizó a través de fotointerpretación por medio de imágenes satelitales de alta resolución disponibles en *Google Earth*, información que luego se complementó con visitas a terreno y entrevistas a habitantes del sector El Panul para comprobar si existía presencia de otras coberturas y/o usos de suelo que se hayan pasado por alto o interpretado de manera errónea. Finalmente, se logró identificar un total de 10 coberturas y usos de suelo para el año 2022 (Tabla 5), las que sirvieron de referencia para fotointerpretar los años 2002 y 2013.

| Categorías | Abreviatura | Descripción |
|---------------------|-------------|---|
| Vegetación Dispersa | (VD) | Cobertura relativamente baja y dispersa, se incluyen especies arbustivas, hierbas anuales, vegetación en general. |
| Vegetación Media | (VM) | Cobertura moderada, principalmente vegetación distribuida en sectores alejados de la costa o circundando áreas de vegetación densa. |
| Vegetación Densa | (VDe) | Asociada principalmente a especies arbustivas leñosas que crecen sobre formaciones rocosas cercanas a la costa y/o quebradas, alta presencia de <i>Myrcianthes coquimbensis</i> . |
| Espacio Abierto | (EA) | Áreas abiertas con escasa cobertura vegetal que no pueden clasificarse como (VD) o que no se sabe con certeza si corresponden a áreas afectadas por actividad antrópica o por otros procesos degradantes. |
| Suelo Desnudo | (SD) | Áreas completamente desprovistas de vegetación, afectadas directamente por actividad antrópica, terrenos raleados, parcelaciones, caminos, etc. |
| Residencial | (RE) | Áreas donde hay viviendas y/o proyectos inmobiliarios en construcción. |
| Industrial | (IN) | Zonas donde se realizan actividades industriales, para el área corresponden a industrias de abaloneras. |
| Comercial | (CO) | Zonas destinadas a áreas comerciales, para el área corresponde a estación de servicio (gasolinera). |
| Costa Rocosa | (CR) | Áreas costeras con características rocosas, intermareal rocoso, formaciones rocosas prominentes. |
| Humedal | (HU) | Áreas húmedas, zona de anegamiento, presencia de vegetación hidrófila. |

Tabla 5. Coberturas y usos de suelo identificados en el sector El Panul.

¹ Registros de precipitación año 2002: Estación La Florida, comuna de La Serena, perteneciente a la DMC.

² Registros de precipitación año 2013 y 2022: Estación El Panul, comuna de Coquimbo, datos provistos por CEAZA.

Para la clasificación de las coberturas de vegetación fue adaptado el método geológico para estimar el porcentaje de componentes en rocas sedimentarias desarrollado por (Terry & Chilingar, 1955) método que ha sido utilizado en otros estudios como referencia para la estimación de la cobertura de dosel (Topik, 1988; Billups & Burke, 1999).

Tomando como referencia este método, se realizó la fotointerpretación de la distribución de la vegetación observada en el área de estudio, utilizando como estimadores de cobertura el esquema disponible en el Anexo (1), donde 1-4% corresponde a Espacio Abierto, 5-10% a Vegetación Dispersa, 15-29% a Vegetación Media y >30% a Vegetación Densa.

La clasificación de las Coberturas y Usos de Suelo para el área de estudio se realizó mediante análisis visual (fotointerpretación) por medio del programa ArcGIS, donde se creó un *Fishnet Grid* sobre las imágenes satelitales, con la finalidad de crear una cuadrícula de polígonos regulares sobre el área de estudio que contara con las mismas dimensiones de los píxeles de los sensores Landsat, 30 x 30 metros, con el propósito de facilitar la fotointerpretación de las coberturas y usos de suelo. Metodologías similares han sido utilizadas en otros trabajos como Moscoso (2007); Sandoval (2009).

La fotointerpretación del área de estudio estuvo acompañada de imágenes disponibles en *Google Earth*, Índice de Vegetación de Ajuste del Suelo (SAVI, por sus siglas en inglés) sumado a imágenes satelitales en composición de falso color para cada uno de los sensores, Landsat 8 OLI/TIRS y Landsat ETM +.

Para el cálculo del Índice de Vegetación se aplicó un *factor de escala* de 0,0000275 y un *off pixel* de -0,2, valores entregados por USGS para las imágenes C2-L2 con la finalidad de obtener rangos válidos que permitan interpretar la reflectancia espectral.

Se escogió el SAVI por sus características para corregir distorsiones causadas por presencia de suelos desnudos o superficies sin vegetación, obteniendo valores más precisos de densidad y estado de la vegetación a diferencia de otros como NDVI. Debido a estas características se encuentra recomendado para el estudio de ecosistemas áridos y semiáridos (P. Muñoz, 2013).

Para analizar la evolución de los cambios de cobertura y uso de suelo para el periodo 2002 – 2022 y los subperiodos 2002 – 2013; 2013 – 2022, se utilizó el programa TerrSet en su versión 19.0.8, el cual cuenta con herramientas de evaluación y modelamiento ampliamente utilizadas en estudios multitemporales de cambio de coberturas y usos de suelo (Sundara Kumar, Udaya Bhaskar & Padmakumari, 2015; Hamad, Balzter & Kolo, 2018; Maviza & Ahmed, 2020; Benavidez-Silva, Jensen, Pliscoff, 2021).

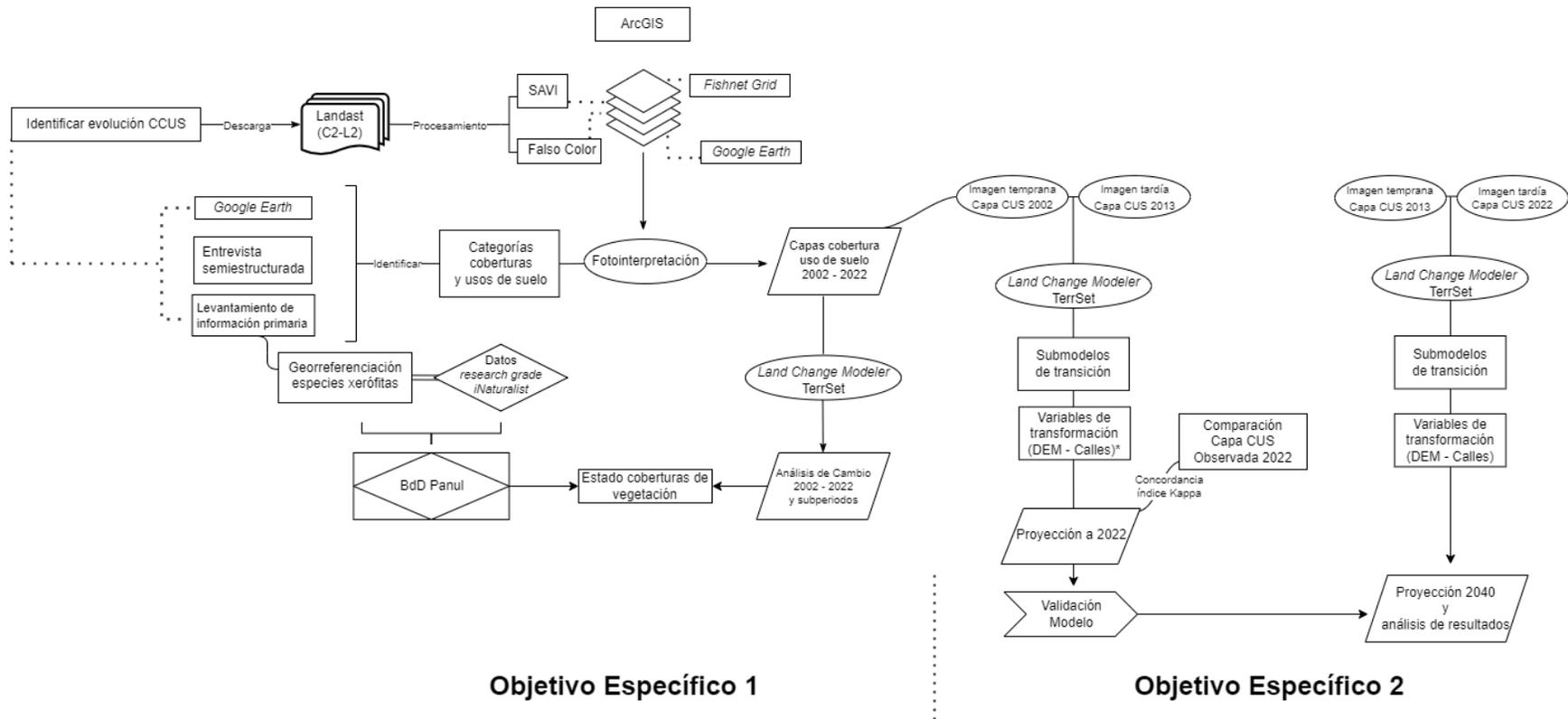
Para determinar el estado actual del matorral costero semiárido se realizó un levantamiento en terreno de especies xerófitas con la finalidad de conocer su distribución geográfica. Se sumó la inclusión de datos disponibles en el portal de ciencia ciudadana *iNaturalist* utilizando aquellos que se encuentran debidamente validados, los cuales son etiquetados como *grado de investigación* dentro de la plataforma, con la finalidad de disminuir posibles errores de identificación de las especies (López-Guillén et al. 2022).

En relación con el análisis de proyecciones de cambio de cobertura y uso de suelos para el año 2040, se utilizó la herramienta *Land Change Modeler* disponible en TerrSet. Siguiendo la metodología propuesta por Sundara Kumar, Udaya Bhaskar & Padmakumari (2015) se hizo la inclusión de un Modelo de Elevación Digital (DEM) y una red de calles del área de estudio en formato raster, ambas con la misma extensión de filas y columnas que las capas de Coberturas y Uso de Suelo (CUS) clasificadas previamente, esto para que sean consideradas al momento de desarrollar la proyección y obtener las transiciones de cambio por categoría.

El modelo de proyección fue realizado utilizando el método *MLP* (ofrecido por el módulo *Land Change Modeler* de TerrSet). Para la validación del modelo, se compararon las imágenes correspondientes al año 2022 proyectado con las del año 2022 observado. El modelo fue validado mediante concordancia de los índices Kappa por lo que permitió aplicar los mismos parámetros para la proyección al año 2040. Estos pasos serán explicados en el capítulo siguiente en la sección correspondiente a la proyección.

Obtenidos los resultados, se buscó reflexionar sobre el estado actual del matorral costero semiárido del sector El Panul, como se ha visto afectado por el crecimiento urbano, dotando la discusión desde una perspectiva geográfica con enfoque desde el ordenamiento territorial. A continuación, se presenta un resumen del marco metodológico para los objetivos específicos 1 y 2 de la investigación (Fig. 5).

2.1.1 RESUMEN MARCO METODOLÓGICO



*En Base a Sundara Kumar, Udaya Bhaskar & Padmakumari (2016).

Fig. 5. Resumen marco metodológico, objetivos específicos 1 y 2.

CAPITULO 3: RESULTADOS

3.1 CAMBIOS EN LA COBERTURA Y USOS DE SUELO, PERIODO 2002 – 2022

El análisis de cambio de cobertura y uso de suelo durante el periodo de estudio permite explorar las transformaciones y patrones que configuran el paisaje actual del sector El Panul. En este primer acercamiento se buscó observar las dinámicas generales de transición de coberturas y usos de suelo (CUS) para luego observar los subperiodos correspondientes a los años 2002 – 2013; 2013 – 2022. Finalmente se realizó la proyección al año 2040.

3.1.1 Cambios en las Categorías de Vegetación

A lo largo del periodo estudiado, las distintas coberturas de vegetación, a saber, Vegetación Dispersa (**VD**), Vegetación Media (**VM**) y Vegetación Densa (**VDe**) y Espacio Abierto (**EA**) han demostrado diversas pautas de cambio y permanencia.

En la Fig. 6. se presenta un gráfico que muestra los cambios en las coberturas y usos de suelo para el periodo 2002 – 2022.

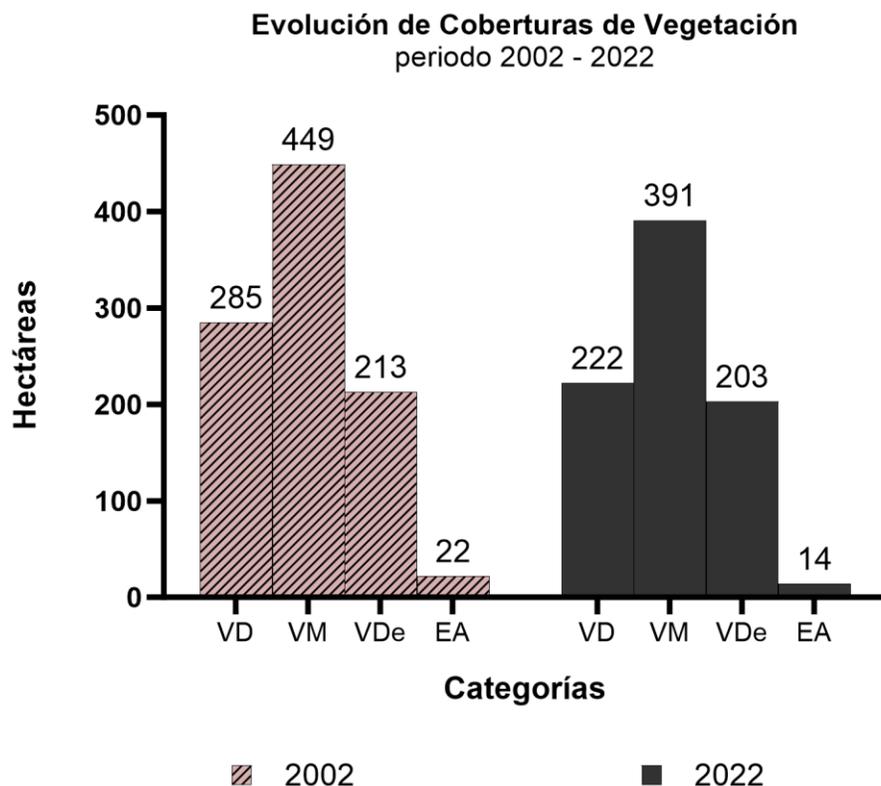


Fig. 6. Gráfico de evolución coberturas naturales, periodo 2002 – 2022.

En el periodo analizado, la cobertura de **VD** es la que se ha visto más afectada por las dinámicas de transición y conversión hacia otras categorías de usos de suelo. Ha disminuido en un 22% su cobertura en un periodo de 20 años, siendo la categoría de vegetación que más se ha visto afectada por las dinámicas urbanas, donde existe una alteración notoria en la cobertura vegetal dispersa hacia usos antrópicos del suelo transitando hacia las categorías de Suelo Desnudo (**SD**) y Residencial (**RE**) con un total de 17 ha y 48 ha, respectivamente. En este periodo la transición de cobertura vegetal dispersa hacia sectores urbanos fue sostenida en el tiempo, llegando esta transformación a un poco más del doble de hectáreas de lo observado para el año 2002 correspondientes a 24 ha.

Otra de las coberturas de vegetación que se ha visto modificada por las dinámicas urbanas es la de **VM**. Para esta categoría se ha mantenido un total de 388 ha sin modificar (86% de su valor inicial en el año 2002), a pesar de esto se ha visto afectada por la alteración del uso del suelo, transitando principalmente hacia Suelo Desnudo (**SD**), Residencial (**RE**) y en una menor medida a Industrial (**IN**), 15 ha, 42 ha y 1.3 ha, respectivamente. Al igual que la cobertura de **VD** en un periodo de 20 años ocurrió una conversión de la cobertura hacia uso de suelo residencial cercana al 100% del valor inicial de 24 ha del año 2002.

Entre ambas coberturas hubo una pérdida de 90 ha que se tradujeron en ganancia hacia un uso residencial del suelo, aportando la mayor cantidad de ha al crecimiento total del área urbana que corresponde a 126 ha para el año 2022. No menos importante es el aumento significativo de la categoría Suelo Desnudo (**SD**), con una ganancia de 32 hectáreas, aumentando el total de hectáreas a 52 para el año 2022, es probable que gran parte de estas hectáreas transiten en un futuro hacia áreas residenciales.

Por otra parte, las coberturas de Vegetación Densa (**VDe**) son las que presentan más estabilidad en el periodo 2002 – 2022, donde se han mantenido un total de 203 ha sin modificación correspondientes al 95.27% de la cantidad total en el año 2002. Al igual que las otras categorías de vegetación, las modificaciones más notables son las que se dirigen hacia las categorías de **SD** y **RE**, con un total de 2 ha y 7 ha respectivamente. Esta alta estabilidad en comparación con las otras coberturas vegetales se puede deber a la dificultad de acceso de las áreas donde se encuentran las zonas de vegetación densa, asociadas principalmente a áreas geográficas más accidentadas. Sectores costeros rocosos de más difícil acceso para el desarrollo de parcelaciones, lo que implicaría un aumento en los costos monetarios para el desarrollo de proyectos inmobiliarios. Las Figuras 7 y 8 muestran las contribuciones al cambio neto de uso **RE** y **SD** en hectáreas para el periodo 2002 – 2022.

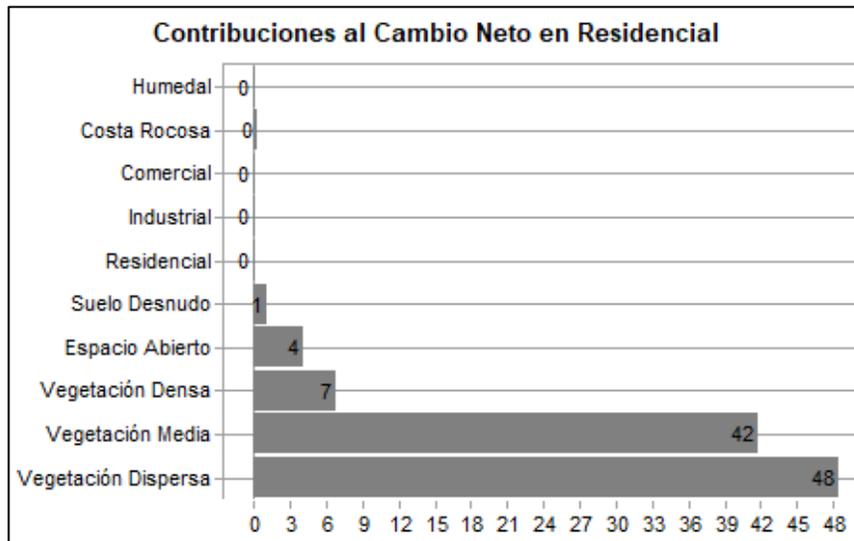


Fig. 7. Contribuciones al Cambio Neto Residencial periodo 2002 – 2022.

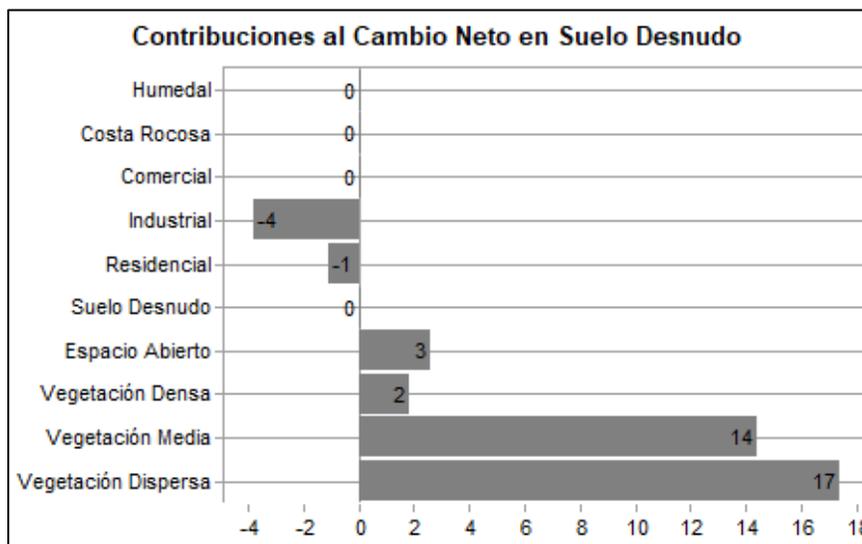


Fig. 8. Contribuciones al Cambio Neto Suelo Desnudo periodo 2002 – 2022.

En este periodo la reconversión de coberturas de vegetación (**VD**, **VM** y **VDe**) entre ellas mismas es muy baja, sin embargo, presentan una tendencia a la disminución. Por ejemplo: la categoría **VM** transita hacia **VD** (2.4 ha) y **VDe** hacia **VD** (0.3 ha) y **VM** (1.1 ha), o hacia sectores que presentan muy baja densidad de vegetación como Espacios Abiertos (**EA**). Estos cambios siempre fueron a coberturas de menor densidad, lo que podría estar relacionado con: a) periodos prolongados de sequía b) una tendencia a la degradación y fragmentación del matorral costero semiárido.

La transición de las distintas coberturas de vegetación identificadas para el sector El Panul demuestran un avance constante en el tiempo de las dinámicas de urbanización y alteración de las coberturas menos densas (**VD** y **VM**) asociadas principalmente a vegetación arbustiva, geófitas, y cactáceas donde se destaca la presencia de *Alstroemeria magnifica*, *Porlieria chilensis*, *Puya chilensis*, *Vasconcellea chilensis*, *Myrcianthes coquimbensis*, *Copiapoa coquimbana*, *Eriogyne subgibbosa*, *Eulychnia breviflora*, entre otros.

Sin embargo, la mayor parte de las poblaciones de lucumillo *Myrcianthes coquimbensis*, se encuentra asociada a sectores densos de vegetación que actualmente han presentado poca variación en el tiempo, lo que ha permitido que la mayor parte de las poblaciones identificadas en el sector El Panul se han mantenido estables, pero con tendencias cada vez más agudas hacia la degradación.

3.1.2 Transición hacia áreas Industriales y Comerciales

Valores de transición menos significativos se pueden observar en los cambios ocurridos hacia las áreas industriales desde otras coberturas y categorías. En orden decreciente: desde **SD** (3.8 ha), **VM** (1.3 ha) y finalmente **Costa Rocosa (CR)** con 1.1 ha, aumentando el área ocupada por la clase Industrial de 3.7 ha para el año 2002 a 9.8 ha al año 2022.

En estas transiciones hacia áreas industriales se encuentran influencias por consideraciones económicas y de desarrollo, tal como ocurrió a comienzos de los 2000 con el llamado 'boom de los abalones', donde en el sector costero de El Panul con el se instalaron cultivos de ostiones y abalones de exportación para satisfacer la demanda del mercado asiático. En la actualidad el sector industrial se encuentra ya consolidado, sin embargo, en el último tiempo se considera desde el gobierno local la posibilidad de un cambio de zonificación en el sector costero.

Las áreas Comerciales (**CO**) mostraron una probabilidad de permanencia de 100% desde el periodo 2002, no existiendo variaciones para el periodo, tratándose de un sector consolidado.

3.1.3 Humedales

La categoría de Humedales (**HU**) mostró una probabilidad de permanencia del 100% para el periodo 2002 – 2022. Las áreas asociadas a zonas de anegamiento y presencia de vegetación hidrófila han permanecido inalteradas, sin embargo, se puede observar una tendencia a la degradación producto de la creación de caminos no planificados.

CAMBIOS EN LA COBERTURA Y USOS DE SUELO, PERIODO 2002 – 2022

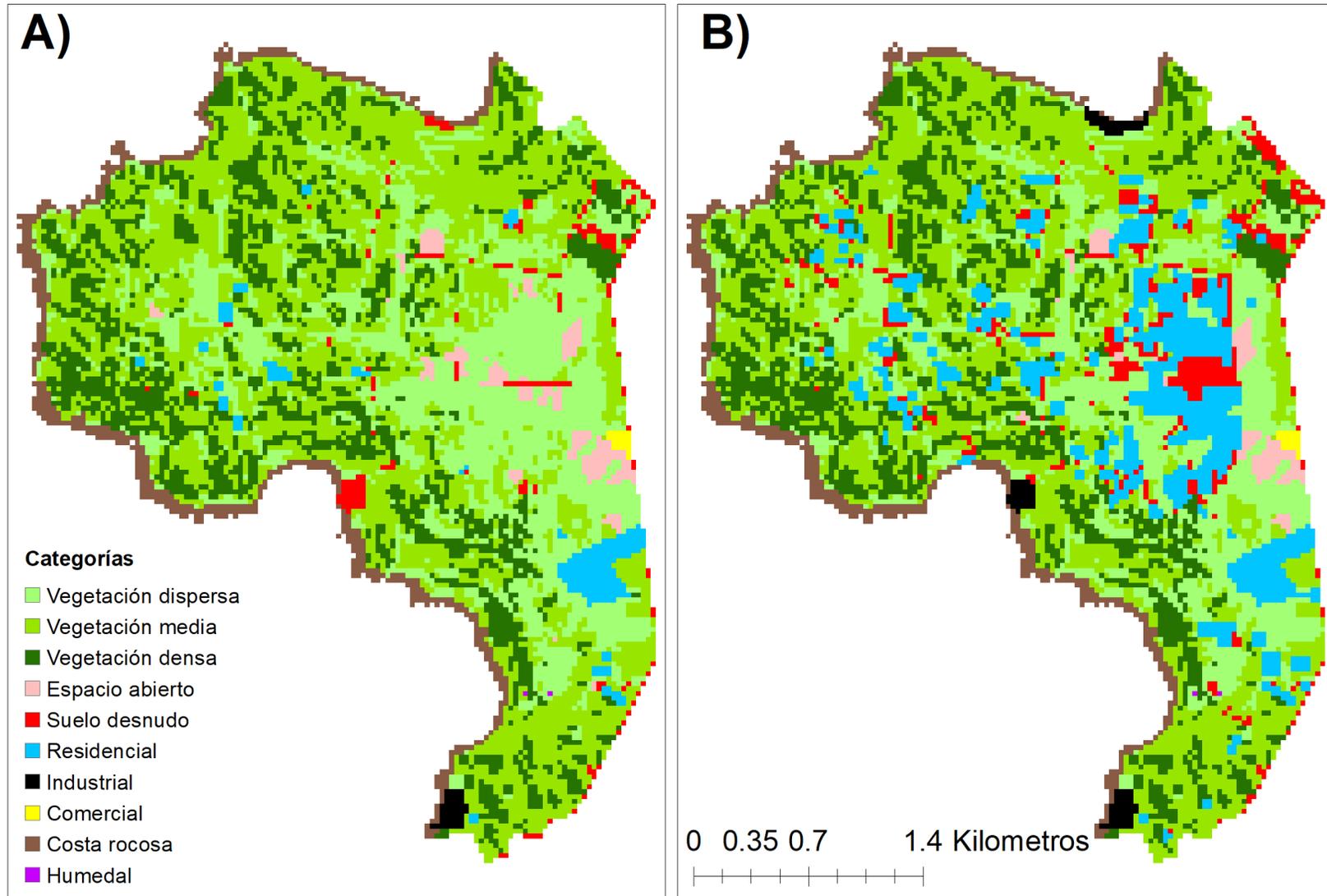


Fig. 9. Cambios de Cobertura y Usos de Suelo. A) año 2002 B) año 2022.

hectáreas ocurridas desde estas coberturas naturales hacia usos antrópicos del suelo. Esta situación se puede observar en las Figuras 11 y 12.

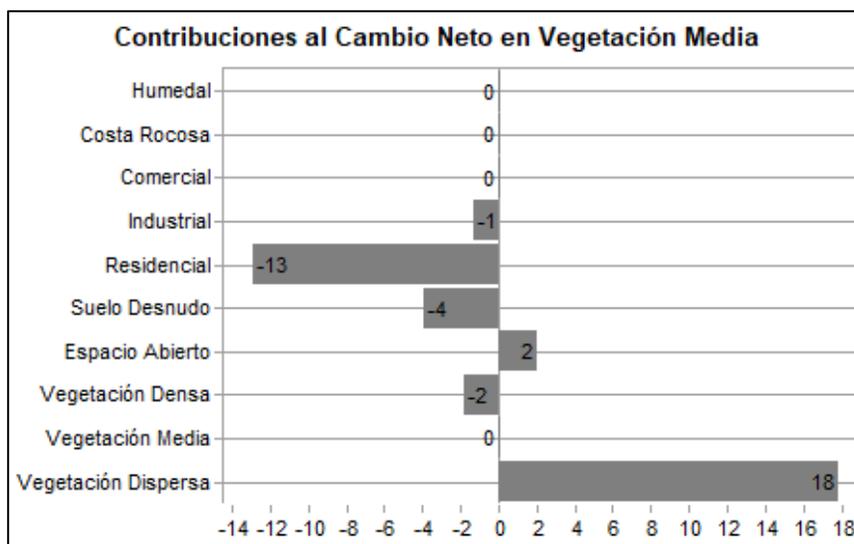


Fig. 11. Contribuciones al Cambio Neto Vegetación Media subperiodo 2002 – 2013.

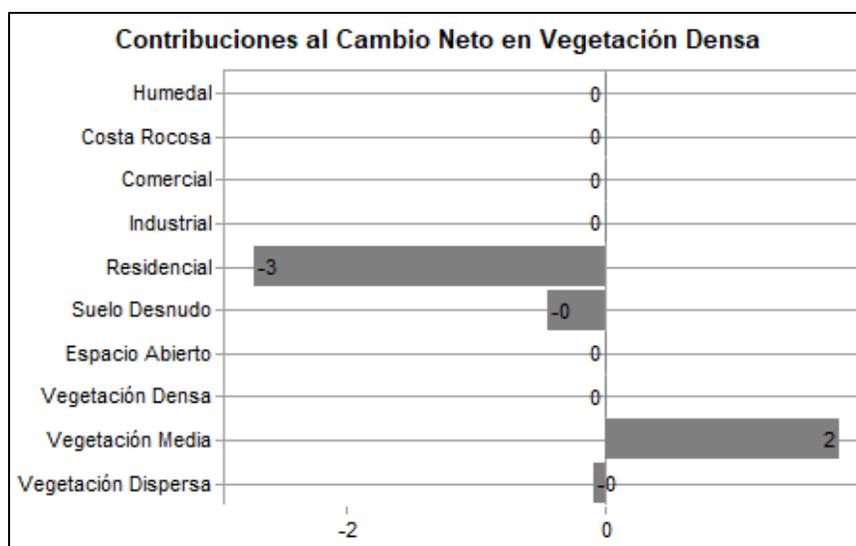


Fig. 12. Contribuciones al Cambio Neto Vegetación Densa subperiodo 2002 – 2013.

3.2.2 Transiciones Suelo Desnudo y Residenciales

El análisis toma una dimensión más dinámica al explorar las transiciones hacia las categorías de Suelo Desnudo (**SD**) y Residencial (**RE**). Las categorías muestran una recepción de transiciones desde las distintas clases de vegetación (**VD**, **VM** y **VDe**). Para el caso de transición hacia uso **RE**, las pérdidas de coberturas naturales alcanzan las 13 hectáreas para **VD** y **VM**, y 3 hectáreas para **VDe**, duplicando el valor inicial de área residencial, alcanzando las 54 ha en un periodo de 11 años.

En relación con el Suelo Desnudo (**SD**) existe una perturbación hacia **VD**, **VM**, **VDe** y **EA**, alcanzando la pérdida total de 12 hectáreas de cubierta natural, aumentando la categoría

de **SD** a un total de 28 ha. Estos cambios desde áreas previamente naturales en áreas de uso antrópico se relacionan directamente con un proceso incipiente de urbanización.

Además, para la categoría de Suelo Desnudo (**SD**) se observa una transición hacia la clase Industrial (**IN**) equivalente a 3.8 hectáreas, donde también se puede observar una pequeña transición hacia (**IN**) desde la categoría Costa Rocosa (**CR**) lo que indica una influencia industrial mínima pero presente en estas áreas, asociadas directamente a recursos marinos.

En la Fig. 13. se grafica la transición en hectáreas desde las distintas categorías de vegetación (**VD**, **VM** y **VDe**) hacia los usos Residencial y de Suelo Desnudo.

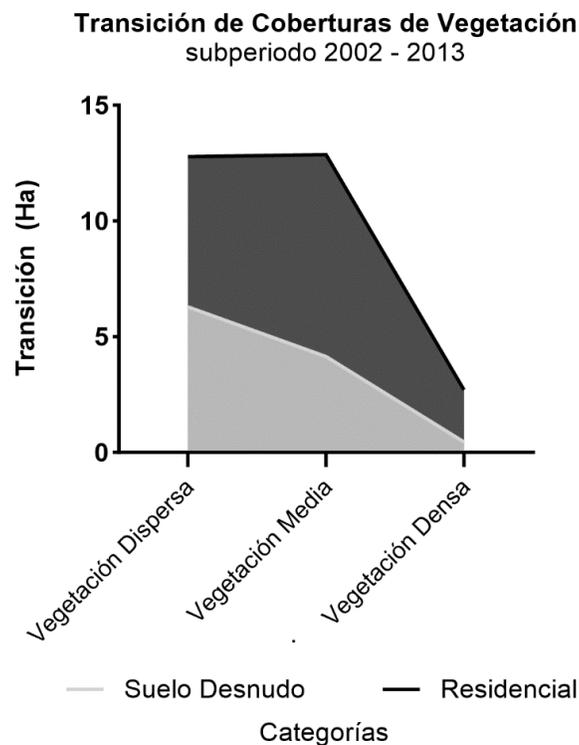


Fig. 13. Transición de Coberturas de Vegetación subperiodo 2002 – 2013.

Para el subperiodo 2002 – 2013, las categorías más dinámicas en cuanto a modificaciones hacia cubiertas antrópicas corresponden a las cubiertas de Vegetación Dispersa (**VD**) y Vegetación Media (**VM**). Son las cubiertas naturales las que se encuentran más propensas a sufrir procesos de transformación hacia usos alterados del suelo.

Por otro lado, la categoría de Vegetación Densa (**VDe**) no presenta mayores cambios de transición. La cobertura vegetal densa tiende a presentar menos dinamismo, y por lo tanto un menor cambio hacia usos de suelo antrópicos, permitiendo la estabilidad de la vegetación asociada a estos sectores.

Se puede observar cómo durante el primer subperiodo de estudio ya se comienza a notar una tendencia de transición desde las categorías de vegetación (**VD** y **VM**) hacia categorías de uso de suelo más alteradas, siendo estas las coberturas más dinámicas. Durante todo el periodo de estudio (2002 – 2022) son las categorías que más transitaron hacia la categoría de uso **Residencial**.

3.2.3 Estabilidad en Clases Industriales

La categoría Industrial (**IN**) muestra algunas variaciones en su crecimiento para el subperiodo 2002 – 2013. Se observan transiciones desde otras coberturas y categorías. En orden decreciente: desde SD (4 ha), VM (1.3 ha) y finalmente Costa Rocosa (**CR**) con 0.9 ha, aumentando el área ocupada por la clase Industrial de 3.7 ha para el año 2002 a 9.6 ha al año 2013. En este subperiodo comienza la instalación el sector costero de El Panul de algunas industrias relacionadas con el cultivo de semillas de ostiones y abalones como se señaló en el periodo 2002 – 2022. A partir de este subperiodo ya se comienza a observar un sector Industrial consolidado en el borde costero, que presenta variaciones mínimas a lo largo del periodo de estudio.

CAMBIOS EN LA COBERTURA Y USO DE SUELO, SUBPERIODO 2002 - 2013

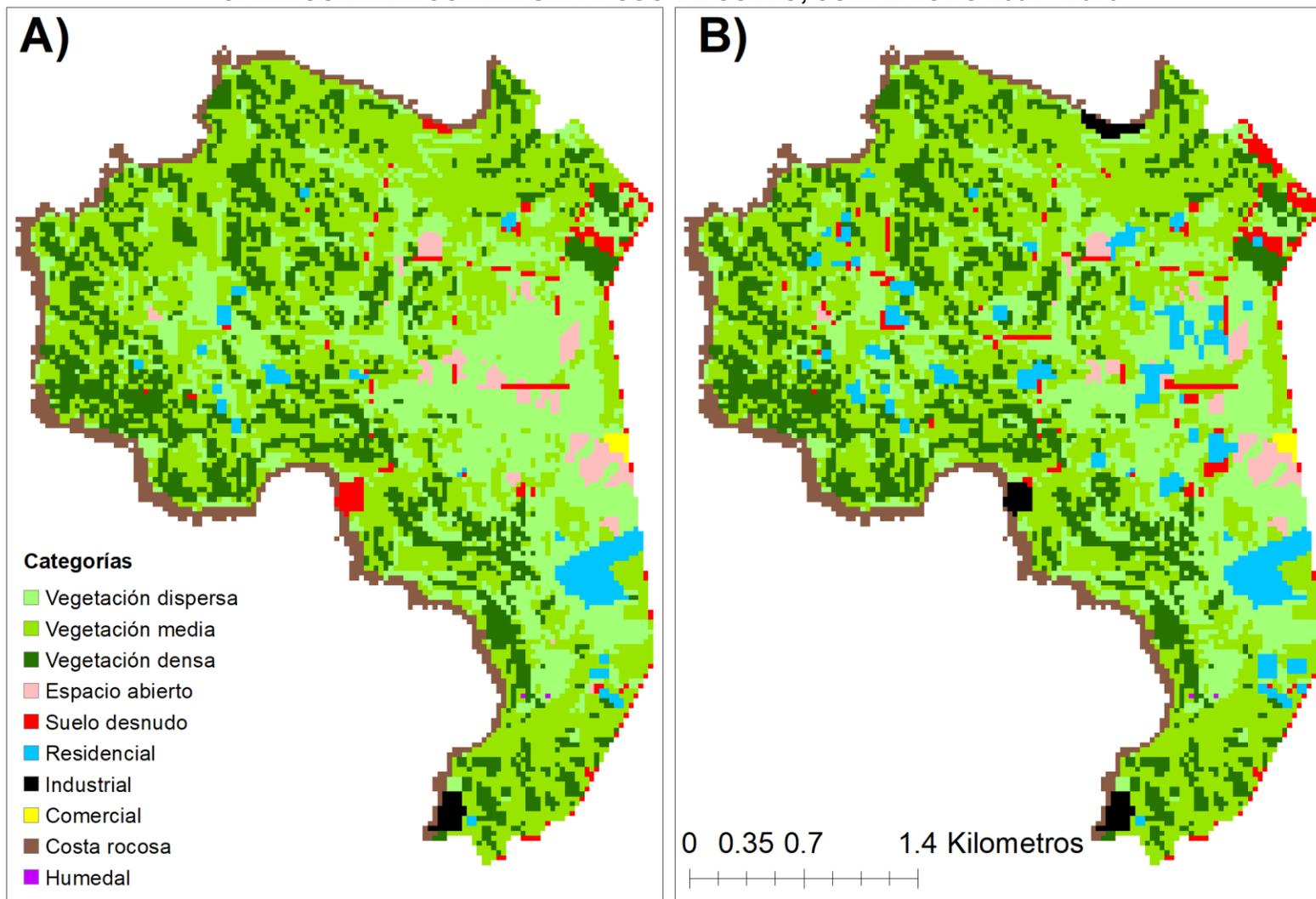


Fig. 14. Cambio de Coberturas y Usos de Suelo. A) año 2002 B) año 2013.

3.3 CAMBIOS EN LA COBERTURA Y USOS DE SUELO, SUBPERIODO 2013 – 2022

3.3.1 Cambios en las Categorías de Vegetación

En este subperiodo, se observa una probabilidad de permanencia relativamente alta para las distintas categorías de vegetación, Vegetación Dispersa (**VD**), Vegetación Media (**VM**) y Vegetación Densa (**VDe**) alcanzando valores notoriamente altos. La categoría **VD**, presenta una permanencia del 87% lo que equivale a 215 ha de las 248 ha iniciales, casi el total de las hectáreas de vegetación dispersa que fueron reemplazadas en este subperiodo se modificaron hacia uso residencial y suelo desnudo.

Las categorías **VM** y **VDe** presentan probabilidades de permanencia de un 86% y 96%, respectivamente, equivalentes a 388 y 203 hectáreas de las 449 y 212 hectáreas iniciales para el año 2013.

En la Fig. 15. se presenta un gráfico que muestra los cambios en las categorías de vegetación en hectáreas para el subperiodo 2013 – 2022.

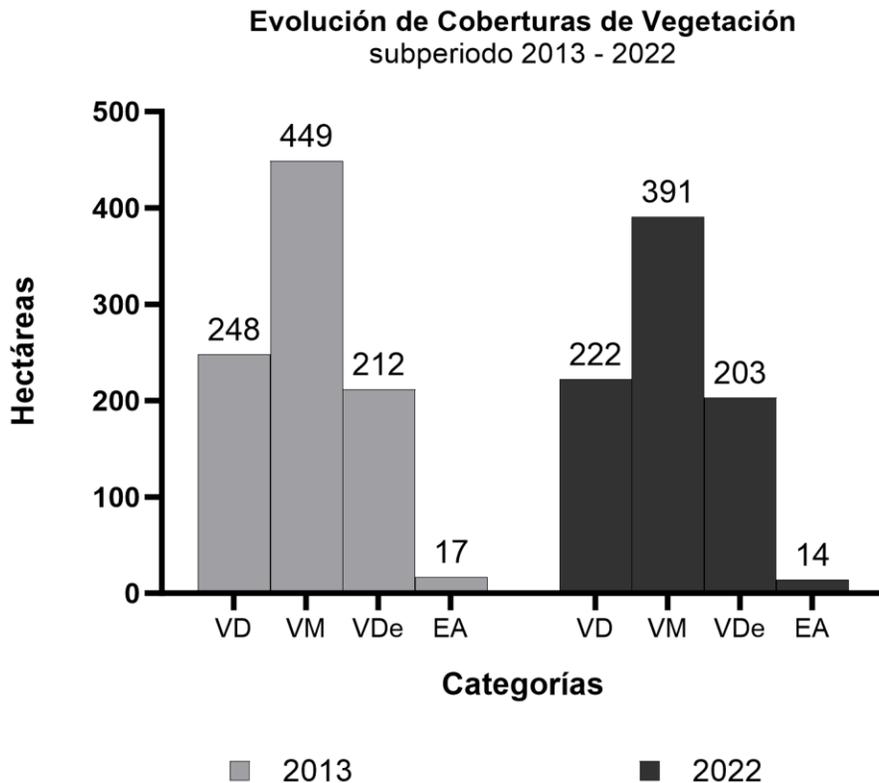


Fig. 15. Gráfico de evolución coberturas naturales subperiodo 2013 – 2022.

3.3.2 Transiciones Suelo Desnudo y Residenciales

Para el segundo subperiodo 2013 – 2022 se observa una transición más significativa desde las distintas categorías de vegetación, Vegetación Dispersa (**VD**), Vegetación Media (**VM**), Vegetación Densa (**VDe**) hacia las categorías Residencial (**RE**) y Suelo Desnudo (**SD**).

La categoría de **VD**, con 248 hectáreas iniciales para el subperiodo presentó una transición de 24 ha hacia uso **RE** y de 8 ha hacia **SD**. En este subperiodo prácticamente se duplica la cantidad de hectáreas de coberturas naturales menos densas que se transformaron en un uso residencial del suelo. Con respecto a la transición desde estas coberturas hacia Suelo Desnudo, los valores son similares al subperiodo anterior, existiendo un aumento de 2 hectáreas.

Para el caso de la categoría de **VM**, de las 449 hectáreas iniciales hubo una transición de 61 hectáreas en total, donde los cambios más notorios fueron hacia **RE** y **SD** con 39 y 16 ha, respectivamente. En este subperiodo en comparación con el subperiodo anterior, prácticamente se triplicaron la cantidad de hectáreas que fueron modificadas desde la cobertura vegetal media hacia el uso residencial del suelo.

A pesar de la incipiente urbanización que se podía observar para el subperiodo 2002 – 2013, se podían visualizar ciertas tendencias de conversión desde coberturas naturales más dinámicas (**VD** y **VM**) hacia sectores residenciales y de suelo desnudo, situación que se evidencia con el aumento explosivo de áreas residenciales sobre coberturas naturales dispersas y medias en este subperiodo.

Para el caso de **VDe**, áreas que han permanecido relativamente estables, se evidencia un traspaso de 5 ha para la categoría Residencial y de 1.6 ha para Suelo Desnudo.

El aumento de las categorías **RE** y **SD** para este subperiodo es de 54 a 126 hectáreas para la primera categoría, mientras que la segunda aumentó de 28 a 52 hectáreas.

La conversión de vegetación entre coberturas naturales comienza a mostrar una tendencia contraria al subperiodo anterior, en vez de procesos de reconversión de áreas menos densas a sectores medios o densos, empiezan a ser reemplazadas por coberturas menos densas: 4.4 y 1 ha de **VM** son reemplazadas por **VD** y **EA**, respectivamente; 1.6 ha de **VDe** por **VM**. Por otra parte, **EA** es la única categoría que muestra una reconversión hacia sectores más densos, específicamente **VD** con 1.4 ha.

Por otra parte, la categoría de Costa Rocosa (**CR**) presenta una transición de 0.27 hectáreas hacia un uso residencial. Llama la atención que sectores que habían sido afectados por un cambio de uso netamente industrial producto de la instalación de plantas de producción relacionadas con la explotación de recursos marinos comiencen a presentar otras variaciones y/o tendencias de transformación. Esta información se encuentra graficada en las Figuras 16 y 17, que muestran las contribuciones al cambio neto en hectáreas para las categorías **RE** y **SD**.

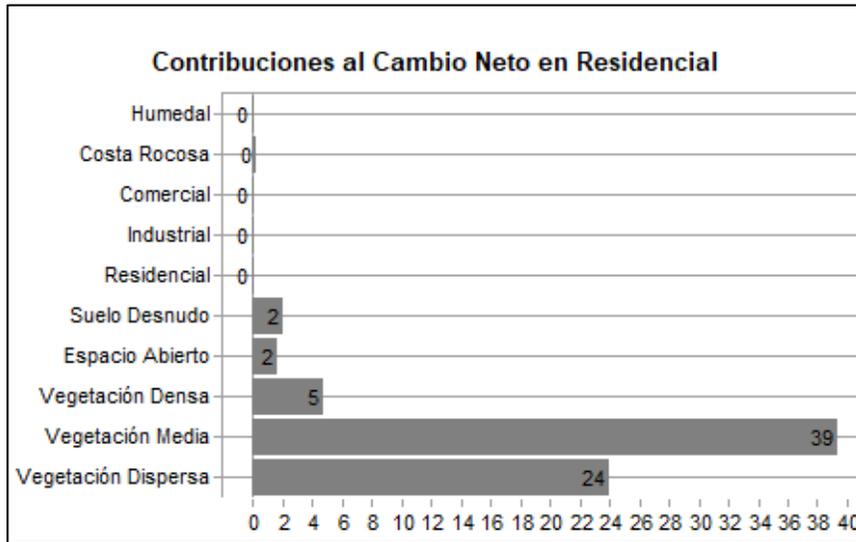


Fig. 16. Contribuciones al cambio neto residencial subperiodo 2013 – 2022.

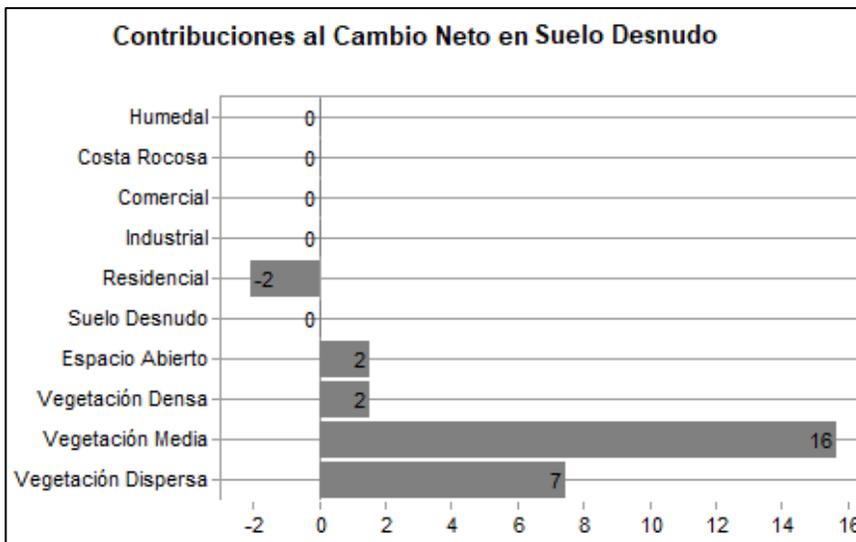


Fig. 17. Contribuciones al cambio neto suelo desnudo subperiodo 2013 – 2022.

3.3.3 Estabilidad en Clases Industriales

Para este subperiodo existe un aumento de 0.18 hectáreas para la categoría Industrial (IN), asociado a una expansión de las zonas previamente establecidas. Esto implica que estas áreas han mantenido su función a lo largo del tiempo, sin cambios significativos en su uso. Dicho aumento termina por consolidar el sector Industrial en el área con un total de 9.8 hectáreas ocupadas.

CAMBIOS EN LA COBERTURA Y USO DE SUELO, SUBPERIODO 2013 - 2022

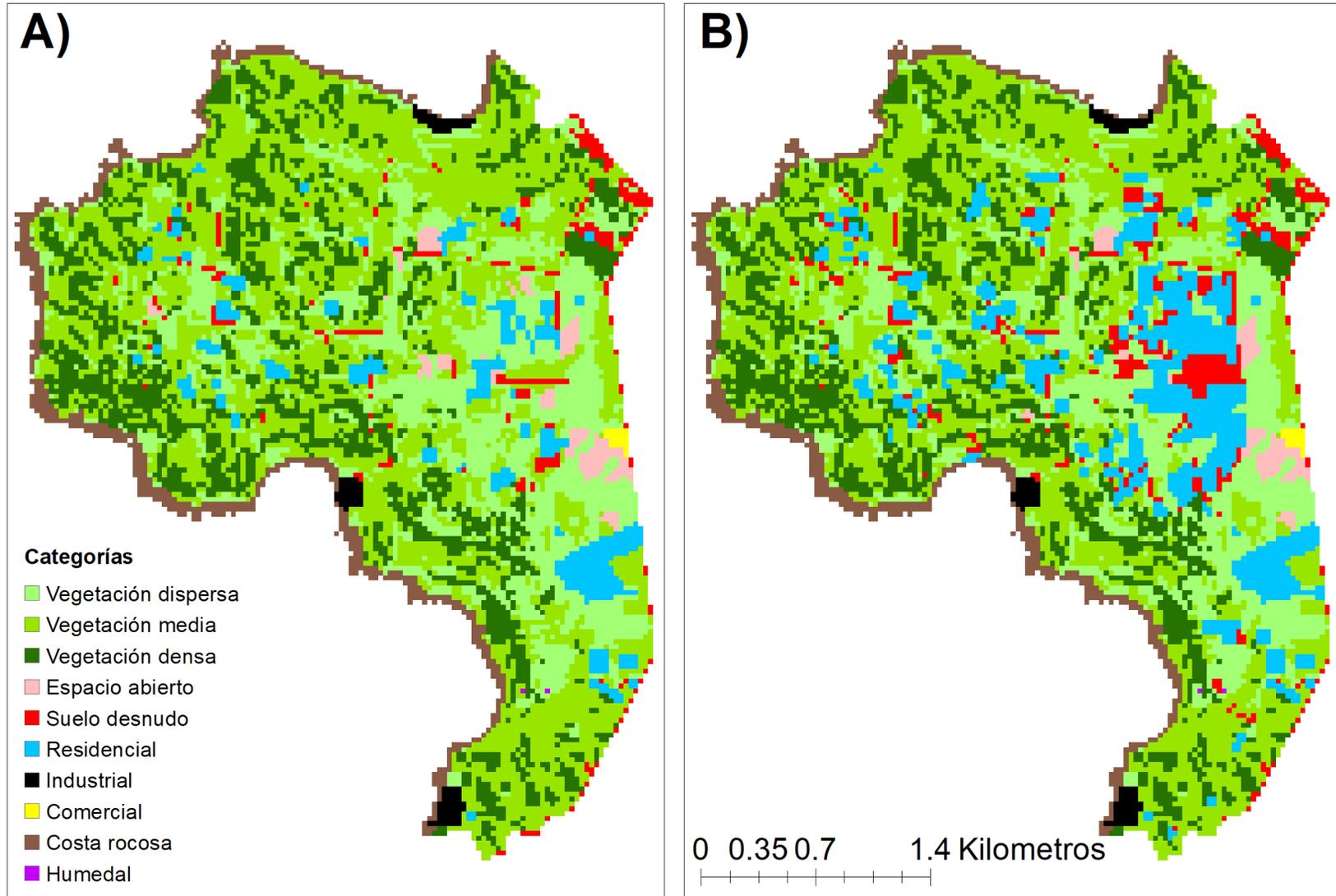


Fig. 18. Cambios de Cobertura y Uso de Suelo. A) año 2013 B) año 2022.

3.4 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

Antes de realizar la proyección al año 2040, fue necesario validar el modelo utilizado para la proyección. Para la correcta calibración y validación del modelo se necesitan al menos tres mapas diferentes, en este caso de los años 2002, 2013 y 2022. Luego el modelo se ejecuta utilizando el año inicial (2002) y el año intermedio (2013) para generar una proyección al año 2022. Este mapa proyectado se compara con el mapa de CUS observado para el mismo año. Si la validación confirma que la proyección es consistente, se aplican los mismos parámetros utilizados en esta etapa para calibrar el modelo *Multi-layer Preceptron (MLP)* para modelar el año 2040, utilizando como entrada los mapas 2013 y 2022 (Amato, Tonini, Murgante & Kanevski, 2018).

A partir de las imágenes de CUS para el año 2002 y 2013 se obtuvo una matriz de probabilidades de transición Markov (Tabla 6) mediante la herramienta *Change Prediction* disponible en el *Land Change Modeler (LCM)* de *TerrSet*.

Tabla 6. Matriz de transición CCUS 2002 – 2013 para predecir el año 2022.

| | VD | VM | VDe | EA | SD | RE | IN | CO | CR | HU |
|-----|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| VD | 0.8807 | 0.0609 | 0.0000 | 0.0029 | 0.0186 | 0.0369 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| VM | 0.0057 | 0.9563 | 0.0046 | 0.000 | 0.0077 | 0.0235 | 0.0022 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| VDe | 0.0003 | 0.0028 | 0.9848 | 0.000 | 0.0018 | 0.0104 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| EA | 0.0420 | 0.0762 | 0.0000 | 0.7952 | 0.0316 | 0.0550 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| SD | 0.0037 | 0.0073 | 0.0000 | 0.0000 | 0.8170 | 0.0183 | 0.1537 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| RE | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 1.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| IN | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 1.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| CO | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 1.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| CR | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0126 | 0.0000 | 0.9874 | 0.0000 |
| HU | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 1.0000 |

La matriz muestra en los valores destacados en negro la probabilidad de permanencia de una categoría. Los demás valores indican la probabilidad de que una categoría transite hacia otra.

Esta matriz de probabilidades de transición es procesada junto con los mapas de transiciones por categoría obtenidos mediante el método *MLP*, obteniendo los patrones espaciales de distribución de las categorías para el año 2022 proyectado. El escenario asumido para las proyecciones fue uno sin intervenciones, en este sentido el mapa final proyectado para el año 2040, se basa en las dinámicas de cambio que se pudieron observar en los años 2002, 2013 y 2022.

Para validar el nivel de precisión del modelo, se realizó una comparación entre la imagen proyectada de CUS para el año 2022 y la imagen real observada para el mismo año, obteniendo los valores del índice Kappa para observar la concordancia entre ambos mapas (Anexo 2).

Se obtuvo un valor del índice Kappa correspondiente a 0.9023 (90%), que se interpreta como una concordancia casi perfecta (McHugh, 2012).

En la Tabla 7 se observa una comparación entre las coberturas y usos de suelo para la imagen 2022 observada y la proyectada, en términos de hectáreas y porcentajes.

| Categorías | Observado | | Proyectado | | Cambios entre el periodo observado y proyectado | |
|--------------|-----------|-------|------------|-------|---|-------|
| | Área (Ha) | % | Área (Ha) | % | Ha | % |
| VD | 222.21 | 20.64 | 234.36 | 21.77 | +12.15 | +1.1 |
| VM | 390.6 | 36.28 | 434.97 | 40.40 | +44.37 | +4.1 |
| VDe | 203.04 | 18.86 | 208.98 | 19.41 | +5.94 | +0.6 |
| EA | 14.04 | 1.30 | 16.38 | 1.52 | +2.34 | +0.2 |
| SD | 51.84 | 4.82 | 35.55 | 3.30 | -16.29 | -1.5 |
| RE | 126.09 | 11.71 | 77.31 | 7.18 | -48.78 | -4.5 |
| IN | 9.81 | 0.91 | 9.63 | 0.89 | -0.18 | -0.02 |
| CO | 1.8 | 0.17 | 1.8 | 0.17 | 0 | 0 |
| CR | 56.97 | 5.29 | 57.42 | 5.33 | +0.45 | +0.04 |
| HU | 0.18 | 0.02 | 0.18 | 0.02 | 0 | 0 |
| TOTAL | 1076.58 | 100 | 1076.58 | 100 | | |

Tabla 7. Comparación entre CUS 2022 Observado y 2022 Proyectado.

3.5 ANÁLISIS DE CAMBIO DE COBERTURA PERIODO PROYECTADO 2022 – 2040

3.5.1 Cambios en las categorías de Vegetación

Para el periodo proyectado 2022 – 2040, se observan cambios significativos en las categorías de vegetación. Para la categoría de Vegetación Dispersa (**VD**) se mantuvieron 170 hectáreas estables de las 222 hectáreas iniciales. Las hectáreas de **VD** que transitaron solo lo hicieron hacia dos categorías: 13 hectáreas se convirtieron en Suelo Desnudo (**SD**) mientras que 41 hectáreas fueron reemplazadas por uso Residencial (**RE**). Por otro lado, la Vegetación Media (**VM**) conservó un total de 300 hectáreas sin cambios, y al igual que la cobertura **VD** sólo se vio reemplazada por las mismas dos categorías, 25 hectáreas cambiaron a **SD** mientras que un total de 65 hectáreas fueron reemplazadas por uso **RE**, con un total de 90 hectáreas de **VM** transformadas hacia estas categorías.

En el caso de Vegetación Densa (**VDe**), se vuelve a evidenciar un alto nivel de permanencia, de las 203 hectáreas iniciales 190 siguen sin cambios, sin embargo, hubo una reconversión de 0.8 hectáreas hacia zonas menos densas, siguiendo las dinámicas observadas en el subperiodo 2013 – 2022. Con respecto al cambio de cobertura hacia usos de suelo alterados, se observa una modificación de 3 y 9 hectáreas, hacia **SD** y **RE**, respectivamente.

En menor medida, desde Espacio Abierto (**EA**) aproximadamente 3 hectáreas fueron reemplazadas por un uso residencial del suelo. La Fig. 19 muestra los cambios en la evolución de coberturas naturales para el periodo 2022 – 2040

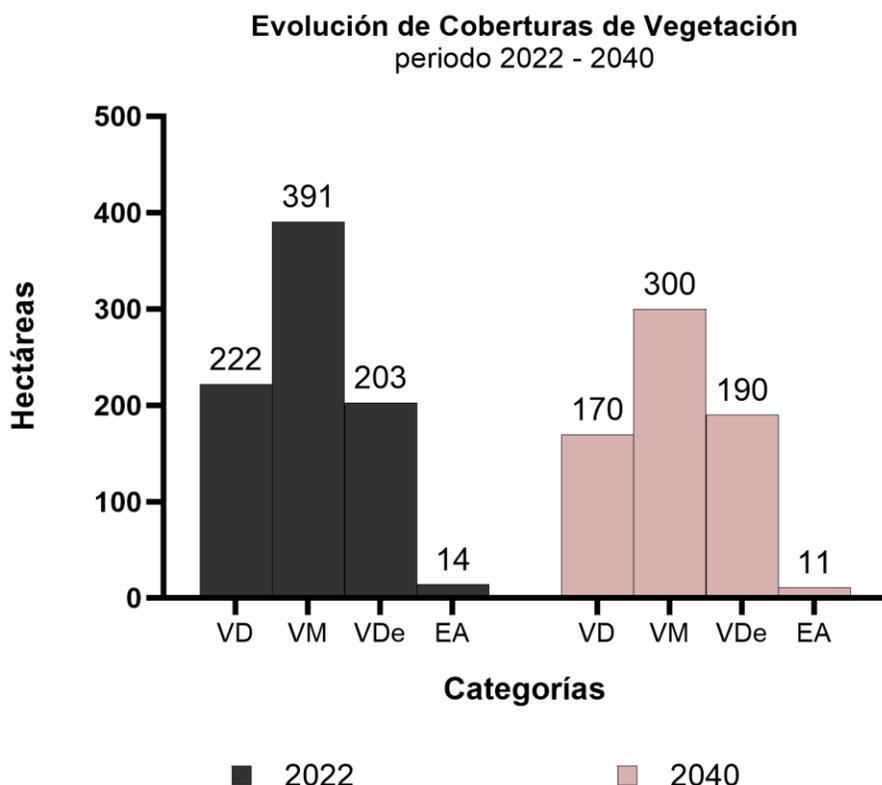


Fig. 19. Gráfico de evolución coberturas naturales periodo 2022 – 2040.

La tendencia de las coberturas naturales **VD** y **VM** para verse modificadas en **SD** y **RE** se venía observando tanto en los subperiodos como en el periodo 2002 – 2022, sin embargo, en este lapso de 18 años se observó un crecimiento más explosivo de las áreas residenciales, indicando un proceso de urbanización más acelerado. Se evidencia el cambio de 65 hectáreas de cobertura natural media a uso urbano, superando incluso las 42 hectáreas del periodo 2002 – 2022.

El año proyectado considera un aumento del 99,21% de las áreas urbanas para el área de estudio, pasando de las 126 hectáreas del año 2022 a 251 hectáreas, siendo las principales coberturas que aportan a este crecimiento las de vegetación dispersa y media. Como ya se mostró en los análisis anteriores dichas categorías son las que más se han visto afectadas por el crecimiento urbano. Las contribuciones al cambio neto de las categorías **RE** y **SD** pueden observarse en las Figuras 20 y 21.

La alta permanencia que muestran las áreas de Vegetación Densa (**VDe**) y que, corresponde además a sectores donde se han registrado presencia de lucumillo, *Myrcianthes coquimbensis* es un buen indicio para generar propuestas de conservación en el sector El Panul que permita continuar con la estabilidad de estas áreas, donde se busque además la protección de sectores adyacentes que permitan una restauración natural de las coberturas naturales como las que se evidenciaron en el subperiodo 2002 – 2013 cuando las perturbaciones antrópicas en el área eran incipientes.

Fig. 20.

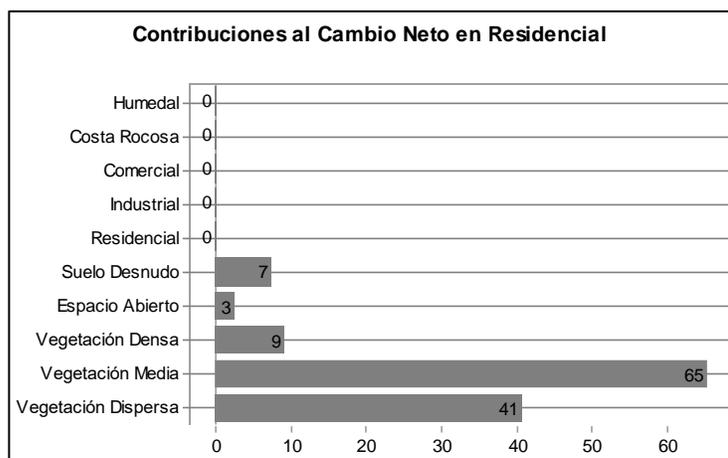
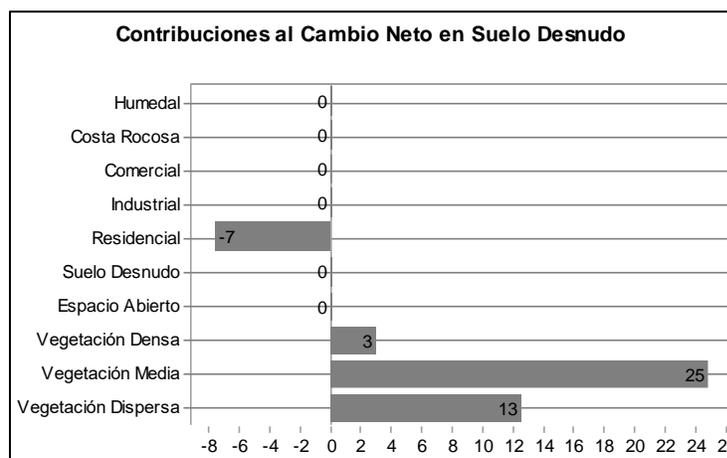


Fig. 21.



En ambos gráficos se señalan las contribuciones en hectáreas de todas las categorías al crecimiento de las categorías Residencial (**RE**) y Suelo Desnudo (**SD**) para el periodo 2022 – 2040.

3.5.2 Transición desde Suelo Desnudo a Residencial

Desde Suelo Desnudo (**SD**) un total de 7.5 hectáreas fueron modificadas por uso **RE**, alcanzado un total de 85 hectáreas de **SD** para este periodo, sumando las distintas transiciones desde las coberturas naturales. Sin duda, la cantidad de **SD** evidencia el aumento constante de las dinámicas de expansión urbana en el sector, donde se está eliminado vegetación y áreas naturales para dar paso a la construcción de infraestructura urbana. Las tendencias muestran que hay una conversión desde **SD** a **RE** que ha sido sostenida en el tiempo.

LIMITES URBANOS PROYECTADOS PARA EL AÑO 2040, SECTOR EL PANUL

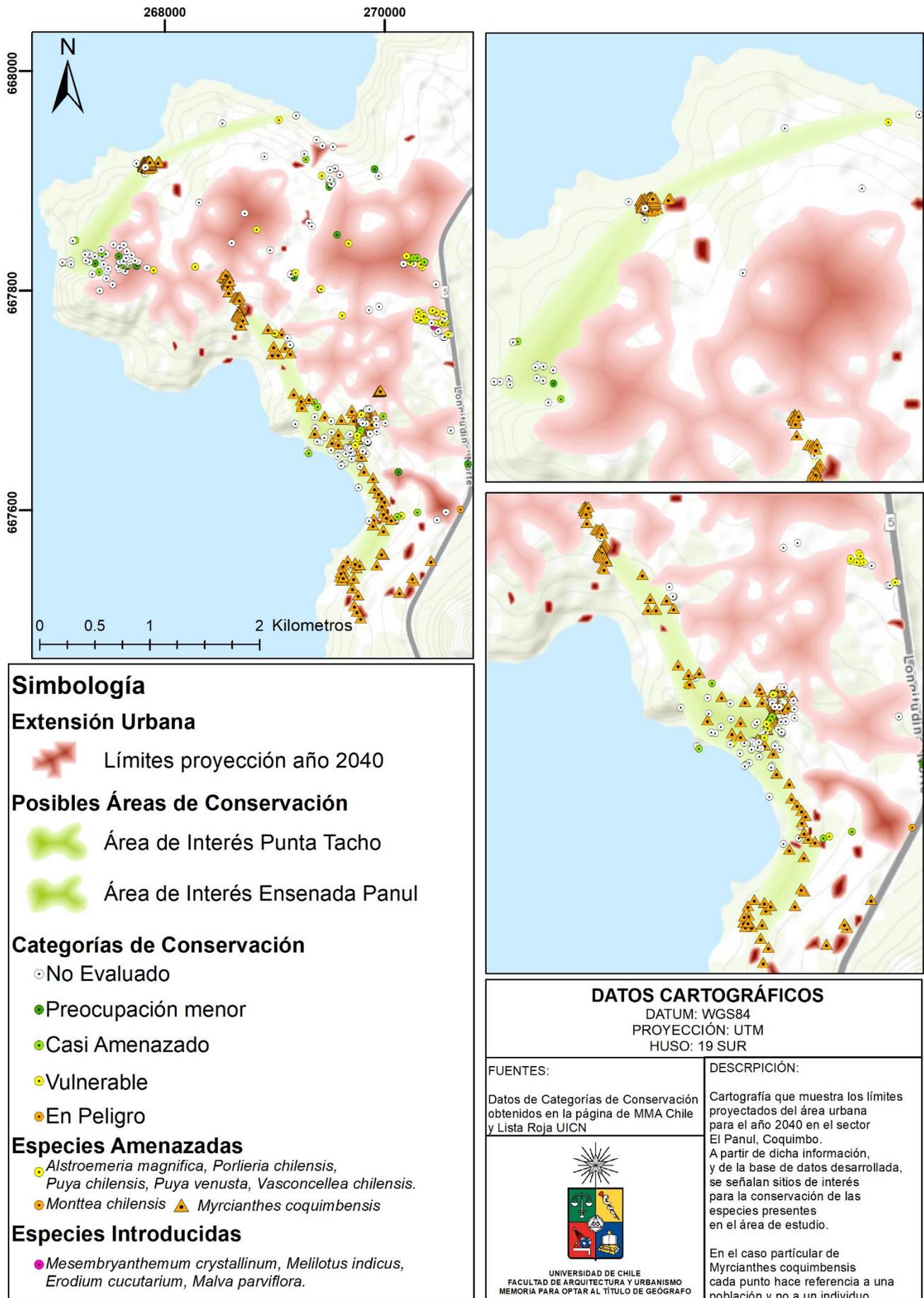


Fig. 22. Límites urbanos proyectados año 2040.

Simbología

Extensión Urbana

Límites proyección año 2040

Posibles Áreas de Conservación

Área de Interés Punta Tacho

Área de Interés Ensenada Panul

Categorías de Conservación

- No Evaluado
- Preocupación menor
- Casi Amenazado
- Vulnerable
- En Peligro

Especies Amenazadas

- Alstroemeria magnifica*, *Porlieria chilensis*, *Puya chilensis*, *Puya venusta*, *Vasconcellea chilensis*.
- Monttea chilensis* *Myrcianthes coquimbensis*

Especies Introducidas

- Mesembryanthemum crystallinum*, *Melilotus indicus*, *Erodium cicutarium*, *Malva parviflora*.

En el caso particular de *Myrcianthes coquimbensis* cada punto hace referencia a una población y no a un individuo.

3.5.3 Importancia para la conservación

A partir de la Fig. 22 se observan los límites proyectados para el año 2040 en el sector El Panul. Como se señaló con anterioridad, la tendencia de ocupación de las áreas residenciales abarca sectores con presencia de cobertura natural dispersa y media, donde existe presencia de algunas especies amenazadas tales como *Alstroemeria magnifica* (VU), *Porlieria chilensis* (VU), *Puya chilensis* (VU), *Vasconcellea chilensis* (VU), *Monttea chilensis* (EN), *Myrcianthes coquimbensis* (EN).

Cabe señalar que las especies presentes en la cartografía anterior corresponden a individuos observados a partir de la información colectada en terreno y por medio de los datos *research grade* obtenidos de *iNaturalist*, donde se lograron reunir 622 datos. Todos los datos de *Myrcianthes coquimbensis* fueron georreferenciados en terreno, para este caso en particular el censo corresponde a nivel de población y no de individuo. A partir de los datos obtenidos se evidencia la presencia de 77 especies correspondientes a 67 géneros con un origen de 18 nativas, 55 endémicas y 4 introducidas, cantidades que podrían aumentar dependiendo de la prospección de nuevas áreas, época de muestreo, etc.

Myrcianthes coquimbensis se trata de un arbusto tropical relictivo, una especie anacrónica que existe desde tiempos en que las condiciones climáticas más cálidas y lluviosas permitían la presencia de bosques húmedos en estos territorios, antes de que una sucesión de procesos geológicos, climáticos y oceánicos determinaran el desarrollo de la diagonal árida en el continente.

En este sentido las condiciones climáticas de la región semiárida del territorio claramente responden a un clima mucho más seco que el de tiempos remotos, pero se sabe que la vegetación que se ve expuesta a prolongados periodos secos ha desarrollado diversas estrategias y asociaciones vegetales para sortear estas adversidades climáticas (Aguiar & Sala, 1999; Gutiérrez & Squeo, 2004; De-la-Rosa-Mera & Monroy-Ata, 2006; Martínez & Pugnaire, 2009).

En el caso de El Panul, las poblaciones de lucumillo presentes en el área son una de las más abundantes de su distribución austral, por lo que identificar como se desarrollan las dinámicas urbanas en el periodo de estudio y su respectiva proyección, pueden ayudar a comprender las dinámicas de crecimiento sobre el sector, permitiendo generar nuevas pautas de ordenamiento y planificación territorial que ayuden a preservar el matorral costero.

Si bien, en las últimas décadas las poblaciones han presentado cierta estabilidad, es posible que se traten de individuos que en algún momento sufrieron procesos degradantes severos. Saldías & Velozo (2014) mediante el estudio de propagación de la especie, en condiciones de laboratorio obtuvieron luego de 7 meses un crecimiento promedio de 14,1 cm y una altura máxima de 40 cm. Para el sector norte del área de estudio se obtuvo una altura promedio de 69 cm y se registró una altura máxima de 1,64 metros (Ibáñez & Sandoval, datos no publicados).

En este sentido, Folchi (2001) por medio del estudio histórico de la industria del cobre en Chile durante el siglo XIX, analiza la transformación que ha sufrido el espacio geográfico del Norte Chico, donde se explora en la tesis que los antiguos paisajes que conformaban

la región semiárida eran verdaderos vergeles que sufrieron una dramática disminución de su cubierta natural producto de una explotación sistemática de la misma.

Para términos prácticos se destacarán solamente algunas descripciones que Folchi (2001) rescata de habitantes y visitantes de paso que tienen directa relación con la vegetación presente en sectores costeros de la ciudad de La Serena, y no se ahondará en cómo se ha llevado a cabo el modelo de desarrollo extractivista y altamente degradante de la industria cuprífera que afectó notoriamente la biomasa producto de la tala y quema en hornos de fundición, y que sin duda repercutió en las asociaciones ecosistémicas, recursos hídricos y edáficos actuales.

Folchi (2001) pone de ejemplo descripciones muy vívidas que permiten comprender como se distribuían en parte la vegetación en la franja litoral. Entre ellas destaca la presencia de *mirtos* y *arrayanes* asociados a sectores ribereños y de vegas. De un hermoso follaje siempreverde, constituyendo hermosos boscajes.

De estas descripciones se puede inferir: 1) que la ciudad de La Serena se encontraba rodeada por el norte y oeste por bosques con predominancia de dichas plantas 2) que las especies descritas posiblemente corresponden a *Myrcianthes coquimbensis* y *Luma chequen*. Esto último se desprende de que son las únicas mirtáceas con distribución actual en la región, lucumillo, *Myrcianthes coquimbensis* (antes llamado *Myrtus coquimbensis*) y arrayán blanco, *Luma chequen*, con una distribución azonal asociado a sectores húmedos y quebradas.

Lo anterior resulta útil para comprender la distribución geográfica que tenía *Myrcianthes coquimbensis*. Actualmente cuenta con poblaciones restringidas a un área geográfica acotada de 83,7 km de longitud que se extiende desde la comuna de La Higuera hasta el sur del complejo turístico Las Tacas (Ibáñez & Sandoval, datos no publicados). Posiblemente existía una continuidad en todo el borde costero regional de poblaciones de *Myrcianthes coquimbensis*, y que, producto de las dinámicas urbanas y económicas comenzaron a diezmar y fragmentarse. Serra, Gajardo & Cabello (1986) refuerzan esta idea al plantear que en sectores donde hoy se desarrollan actividades portuarias (Coquimbo y Guayacán) existieron importantes poblaciones que hoy se encuentran extintas.

En áreas vegetales categorizadas como medias y densas existe la presencia de *Myrcianthes coquimbensis*, por lo que un aumento sostenido y constante de la presión urbana en el ecosistema de matorral costero de El Panul podría desencadenar una mayor fragmentación de las poblaciones, y hasta la posible desaparición en algunos sectores, como se ha venido evidenciando históricamente.

Además, el aumento de las presiones antrópicas en el área podría desencadenar en una posible pérdida de las relaciones planta-animal que han mantenido estable la distribución de la especie. Hasta finales del Pleistoceno quienes dispersaban los frutos de lucumillo era megafauna herbívora hoy extinta. En la actualidad pequeños roedores (*Phyllotis darwini*, *Octodon degus*, *Abrothrix olivaceus*) están cumpliendo la función de dispersores y consumidores de frutos de *Myrcianthes coquimbensis* al descartar fragmentos en sectores de afloramientos rocosos, permitiendo el reclutamiento de nuevas plántulas (Loayza, *et al.* 2014; Loayza, Luna & Calviño-Cancela, 2020).

Los efectos de las perturbaciones antrópicas sobre los ensamblajes de micromamíferos se encuentran bien documentados (Muñoz-Pedrerros, Fletcher, Yáñez, & Sánchez, 2010; Pávez *et al.*, 2010; Larraguibel-González, *et al.*, 2021). La disminución constante de los hábitats de matorral comienza a disponerse en el paisaje como fragmentos cada vez más pequeños y distantes entre sí, rodeados por una matriz circundante de vegetación más abierta lo que puede ser determinante para el reclutamiento de nuevas plántulas (Bustamante, 2009). Esta fragmentación y reducción constante de los hábitats genera problemas de inviabilidad a numerosas especies en estos paisajes perturbados (Gurrutxaga & Lozano, 2006). Para el caso de Chile central, los micromamíferos usan con mayor frecuencia los espacios que se encuentran cercanos a los arbustos y rocas (Muñoz-Pedrerros, Murua & González, 1990), al ser especialistas en hábitats asociados a estratos medios-bajos se encuentran propensos a sufrir cambios en la biodiversidad de los ensamblajes producto de estas variaciones de cambios de usos de suelo. (Anexo 3).

En la actualidad la zonificación de uso de suelo del sector costero correspondiente a la Ensenada El Panul puede sufrir modificaciones si se implementa un proyecto de planta desaladora. Si se consideran los resultados obtenidos para los distintos periodos y proyección, se evidencia que las áreas de vegetación densa suelen estar asociadas a afloramientos rocosos paralelos a la costa. Por lo que cualquier cambio de uso de suelo en estos sectores puede ser devastador para la especie y el ecosistema en general.

Se pone especial énfasis en *Myrcianthes coquimbensis* al tratarse de una especie que se encuentra en peligro de extinción, siendo más susceptible a ser considerada como objeto de conservación para una posible implementación de áreas de conservación. Sin embargo, la protección debe estar enfocada a un nivel ecosistémico y no a nivel de la distribución de una especie en particular, que permita una conectividad entre parches evitando los procesos de fragmentación de hábitat producto de las presiones antrópicas observadas en el área de estudio.

Considerando la proyección de la expansión urbana para el año 2040, se señalaron dos áreas de interés, una correspondiente al sector norte del área de estudio nombrada como Punta Tacho y otra al sur correspondiente a la Ensenada El Panul.

Los criterios utilizados para la selección de estas áreas fueron principalmente dos: 1) la no intervención de los límites proyectados hacia estas áreas de interés y 2) la presencia o ausencia de puntos georreferenciados de especies. La longitud y el área de estas zonas fueron determinadas solamente por este último criterio, por lo tanto, estas áreas están propensas a modificar su extensión aumentando el área total abarcada, la no presencia de otras posibles áreas o una continuidad entre las mismas se debe netamente a como se señaló con anterioridad a la ausencia de datos de vegetación para algunas zonas.

A modo de ejemplo, se visualiza una baja intervención urbana para el año 2040 en toda la franja litoral, por lo que sería factible dar una continuidad a ambas áreas generando una gran zona de conservación que podría abarcar tanto ecosistemas terrestres como marinos.

Estos datos son solamente exploratorios y no responden a ningún objetivo en particular de esta memoria, por lo mismo, los criterios de selección de las áreas no responden directamente a ninguna metodología que se base en determinar áreas prioritarias para la conservación, sin embargo, resulta interesante señalar estos sectores de alto valor ecológico para su futura protección, por lo que se extiende la invitación a quienes quieran

aportar la protección del ecosistema de matorral costero semiárido en el sector El Panul antes de que el crecimiento de la ciudad siga extendiéndose.

Por otro lado, el crecimiento sostenido evidenciado para el año 2040 es totalmente evitable si se comienza a desarrollar un ordenamiento territorial sostenible, de carácter horizontal y en sintonía con quienes habitan el territorio en la actualidad, que busque evitar la proliferación del crecimiento urbano de baja densidad hacia áreas rurales, a través de:

1. Respetar la zonificación actual que norma el Plan Regulador Comunal de Coquimbo para el sector.
2. Fiscalizar el cumplimiento de la subdivisión predial mínima de 1.000 m² para el caso de las Zonas Mixtas Residenciales (ZU11), evitando la venta de terrenos de menor tamaño como se ha podido evidenciar.
3. Desarrollar la integración o modificación del polígono de las Zonas de Extensión Urbana (ZEU-8) dispuestas en el Plan Regulador Intercomunal del Elqui, que abarca casi la totalidad del área de estudio que establece una división predial mínima de 10.000 m², que en la actualidad tiene vigencia hasta que sean incorporados en las normas urbanísticas del PRC.

A pesar de estas normativas vigentes, se ha evidenciado un crecimiento urbano constante en el tiempo, desregulando el uso de suelo no urbanizable, normalizando la transición hasta estos sectores y, por consiguiente, ha normativizado la ocupación del suelo rural mediante la expansión de una ciudad difusa y fragmentada diluyendo los límites espaciales de la ciudad (Jiménez, Hidalgo, Campesino, & Alvarado, 2018).

CAMBIOS EN LA COBERTURA Y USOS DE SUELO, PERIODO 2022 – 2040

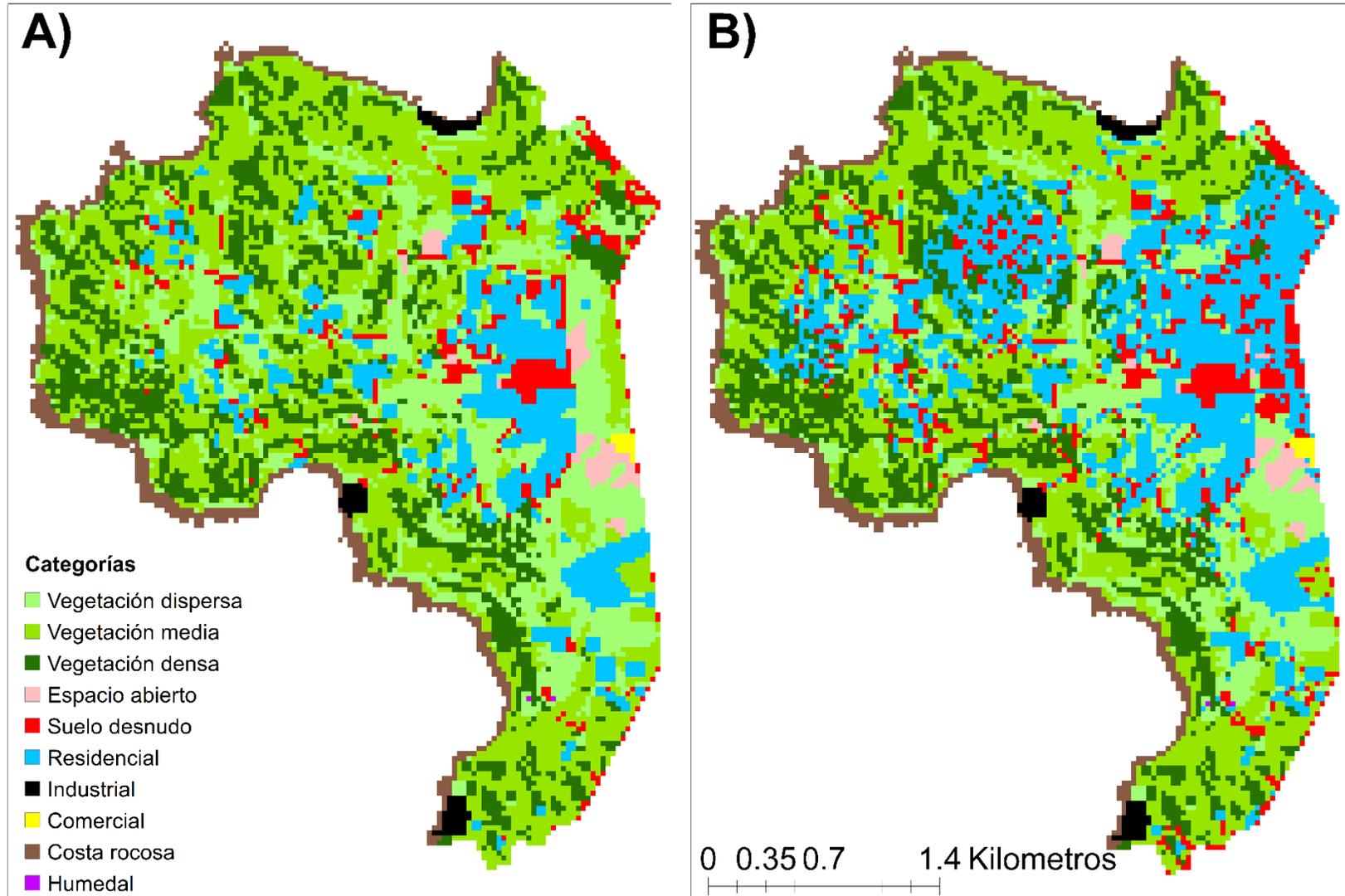


Fig. 23. Cambios de Cobertura y Uso de Suelo. A) año 2022 B) año 2040.

CAPÍTULO 4: DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 DISCUSION

Las dinámicas de crecimiento urbano en el sector El Panul dan cuenta de que existe una transición constante de coberturas naturales hacia usos de suelo antropizados, mayoritariamente áreas transformadas por loteos suburbanos. Estos procesos de urbanización no planificada desde el gobierno local dan cuenta de una situación en donde existe un desarrollo de políticas de ordenamiento territorial incipientes, y, por lo tanto, una desorganizada gestión del territorio. Evidenciando poca claridad con respecto a los mecanismos que actúan dentro de los procesos de ordenamiento territorial, manifestando una debilidad normativa en la práctica de la ordenación del espacio geográfico (Massiris, 2002).

El reemplazo constante de coberturas naturales por áreas urbanizadas en el área de estudio, demuestran esta falta de regularización y normativización. En donde, se normaliza la transición hacia estos sectores, y, por consiguiente, se termina por normar su uso por medio de los Instrumentos de Planificación Territorial: Plan Regulador del Elqui y Plan Regulador de Coquimbo.

La principal problemática que se puede observar en los Instrumentos de Planificación Territorial de carácter normativo es que no promueven un desarrollo sostenible del espacio, ya que existe una superposición de diferentes actividades según los requerimientos del modelo económico al momento de realizar la zonificación de uso de suelo, esto provoca que en muchos casos exista un reemplazo constante de las coberturas naturales por usos de suelo antrópicos (Espinoza, 2019).

La normativización de manera reactiva por medio de los Instrumentos de Planificación Territorial frente a la expansión de la ciudad sobre el sector El Panul, provocó que se comenzara a generar una pérdida sostenida en el tiempo de la biodiversidad del ecosistema de matorral. El aumento de áreas residenciales, su calidad y la configuración espacial, se relaciona directamente con la estructura y la composición de las comunidades biológicas, afectando la biodiversidad del ecosistema (Concepción, 2022).

Este reemplazo constante de coberturas naturales por usos de suelo alterados, provocan que exista un aumento de la presencia de especies exóticas, en donde se pueden observar en sectores cercanos a áreas urbanizadas la proliferación de este tipo de plantas, e incluso una menor biodiversidad de especies autóctonas (Ibáñez & Sandoval, datos no publicados).

A pesar de esto, los sectores de Vegetación Densa presentan una estabilidad constante en los distintos periodos analizados, incluso para la proyección al año 2040 no se observan cambios significativos. Estas áreas corresponden a sitios donde predominan poblaciones de *Myrcianthes coquimbensis*, sin embargo, es necesario considerar las interacciones del ecosistema para determinar si efectivamente a pesar de tener poca transición hacia usos de suelo alterados, se consideran poblaciones estables o con una tendencia a la degradación.

En este sentido, la evidencia de los efectos de las perturbaciones urbanas sobre la biodiversidad de los ensamblajes de roedores pondría en riesgo las interacciones planta-

animal, que como se encuentra documentado mantienen el reclutamiento de nuevos individuos a falta de dispersos originales (Loayza, *et al.*, 2014; Loayza, Luna, Calviño-Cancela, 2020) por lo tanto, se puede señalar una posible degradación de estas áreas a pesar de mantenerse estables en el tiempo.

4.2 CONCLUSIONES

Las dinámicas de crecimiento urbano en el sector El Panul para los distintos subperiodos y periodos analizados dan cuenta de que existen coberturas naturales más propensas a sufrir cambios que otras. En este sentido, las coberturas que más se vieron afectadas producto de la expansión urbana fueron las categorizadas como Vegetación Dispersa y Vegetación Media, con una disminución total del 22% y 13% de su extensión total. Para el caso de la categoría Vegetación Densa, se considera una disminución del 5%. Dichas pérdidas corresponden al periodo 2002 – 2022. Si se considera la proyección al año 2040 se evidencia para el periodo completo una disminución total del 40%, 33% y 11%, respectivamente.

Los procesos de expansión se han ido incrementando con el tiempo, el subperiodo 2002 – 2013 fue el único en donde se pudo constatar una reconversión de coberturas naturales, transitando desde áreas más dispersas a sectores más densos, evidenciando una estabilidad del ecosistema producto de una menor perturbación antrópica.

Para el subperiodo siguiente 2013 – 2022 las dinámicas urbanas siguieron en aumento, con los patrones de transición que se venían observando donde las vegetaciones dispersa y media fueron las que transitaron en mayor cantidad hacia áreas residenciales.

Para el periodo 2002 – 2022 se constató un aumento de 102 hectáreas de uso residencial, alcanzando un total de 126 ha, mientras que, para el periodo proyectado, 2022 – 2040 se evidencia una transición de 126 hectáreas a 251 ha. Es en este periodo donde se termina por observar la ocupación constante de las coberturas dispersa y media para el sector El Panul, mostrando un aumento de las áreas residenciales en las zonas que se fueron consolidando en el periodo 2002 – 2022.

La categoría de Suelo Desnudo es otra categoría hacia la que transitan constantemente las coberturas más dinámicas, evidenciando un cambio hacia usos alterados producto de la realización de caminos no planificados que fragmentan el ecosistema de matorral y/o raleos de terrenos para la construcción de viviendas.

El aumento también fue sostenido en el tiempo pasando de un total de 21 hectáreas a 52 ha para el periodo 2002 – 2022 y finalmente aumentando a 85 hectáreas para el periodo proyectado. Se espera que esta superficie presente una transición hacia áreas residenciales, ya que suelen ser sectores en donde se han desarrollado loteos suburbanos.

Otra de las coberturas que aporta hacia estas categorías es Espacio Abierto. Aunque en menor medida que las coberturas más dinámicas, la transición también es constante. A pesar de su baja cantidad de hectáreas las modificaciones se desarrollaron en todos los subperiodos y periodos, pasando de 22 a 14 hectáreas.

Se observó una estabilidad en las aguadas presentes en el sector El Panul, sin embargo, se presenta una tendencia a la degradación producto de la creación de caminos no planificados para el sector.

Al igual que la categoría anterior, el uso Comercial no presentó variaciones en el tiempo al tratarse de un área consolidada, para satisfacer la demanda de combustible para los automóviles que transitan desde y hacia la ciudad de Coquimbo por la ruta 5.

En el subperiodo 2002- 2013 se desarrolló la consolidación de los sectores Industriales en las áreas costeras, aumentando de 3.7 a 9.6 hectáreas aproximadamente. Este periodo fue en el que se comenzaron a instalar en el sector industrias relacionadas con la producción de semillas de ostiones y abalones para el mercado asiático, con un cambio mínimo ocurrido en el subperiodo próximo, aumentando a un total de 9.8 hectáreas, lo que termina por consolidar dicho uso en el sector.

A partir de los análisis realizados para el periodo 2002 – 2022 queda evidenciado que existe un aumento exponencial de las áreas residenciales en el sector El Panul, sumado a un aumento constante de áreas con suelo desnudo producto de la parcelación por medio de loteos suburbanos.

Las transiciones hacia usos de suelo alterados como suelo desnudo y residencial demuestran la necesidad de controlar la expansión urbana no planificada sobre sectores rurales con la finalidad de mantener áreas naturales y evitar la creciente presión sobre el ecosistema de matorral costero.

El crecimiento constante en el tiempo por medio de loteos hacia sectores rurales demuestra una falta de regularización y normativización del gobierno local. La desregularización del uso de suelo acaba por normalizar la transición hacia estos sectores, y por consiguiente se termina por normar su uso por medio de los Instrumentos de Planificación Territorial, diluyendo los límites urbanos de la ciudad de Coquimbo.

La normativización reactiva de los Instrumentos de Planificación Territorial frente a una expansión de la ciudad sobre áreas rurales provocó una pérdida en la biodiversidad local del ecosistema de matorral costero, producto de la disminución de coberturas de vegetación dispersa y media en el sector El Panul, además de observar una fuerte tendencia a la degradación de los sectores más cercanos a las áreas urbanas.

Las áreas de coberturas naturales densas asociadas a poblaciones de *Myrcianthes coquimbensis* son las que presentan mayor estabilidad en los periodos observado y proyectado. Sin embargo, en un futuro esta estabilidad podría desaparecer si no se realizan planes de manejo, restauración y/o conservación, producto de una posible disminución del reclutamiento de plántulas debido al aumento de las perturbaciones antrópicas sobre el ensamble de micromamíferos nativos que cumplen la función de dispersores a falta de la megafauna extinta.

A partir de la proyección al año 2040, se evidencia que la permisividad que existe actualmente con respecto de la extensión de los centros urbanos hacia sectores rurales y particularmente en el sector El Panul, puede provocar un aumento considerable de las áreas urbanas en un mediano-largo plazo en sectores que no se encuentran equipados para dinámicas urbanas, lo que podría generar una transición hacia uso de suelo urbano aumentando aún más las presiones en el periodo proyectado.

4.3 RECOMENDACIONES

Para mitigar impactos negativos producto de posibles cambios de zonificación en el área, es necesario realizar evaluaciones de impacto ambiental exhaustivas antes de aprobar nuevos proyectos de desarrollo. El desarrollo de instancias de discusión abiertas a la ciudadanía garantizará que los cambios en el uso de suelo sean sostenibles y respetuosos con la biodiversidad de El Panul.

Los sectores arqueológicos presentes en área de estudio deben ser considerados al momento de proponer zonas de conservación, al igual que los humedales, el intermareal rocoso y áreas marinas adyacentes a los sectores terrestres generando una gran unidad de preservación que ayude a mantener la estabilidad del patrimonio natural y cultural de la región.

Es importante fiscalizar los procesos de urbanización que se llevan a cabo en el área, donde se cumpla con la normativa vigente de zonificación de usos que se encuentran en el Plan Regulador Comunal de Coquimbo, y en el Plan Regulador Intercomunal del Elqui. Es esencial realizar una zonificación efectiva y regularizar sus usos.

Las dinámicas observadas en los periodos 2002 – 2022 y 2022 – 2040 pueden tener consecuencias en la pérdida de biodiversidad, los recursos naturales y la calidad de vida de las comunidades. Es necesario realizar un trabajo de integración con los habitantes del sector para generar procesos de participación ciudadana y gestión del territorio.

Una alternativa puede ser generar microreservas de flora, que permitan la conservación a nivel intercomunal a lo largo del borde costero, identificando sectores claves desde el área de La Higuera a Coquimbo. Esto podría ayudar a mantener la estabilidad de las poblaciones de *Myrcianthes coquimbensis*. La planificación del territorio debe enfocarse en la conservación y restauración de estas áreas. Una planificación adaptativa permite poder ajustar las estrategias a medida que van evolucionando y cambiando las condiciones del territorio, garantizando la resiliencia del paisaje frente a futuros cambios.

Finalmente, es crucial seguir monitoreando y evaluando las tendencias de cambio. La integración de información satelital de una mayor resolución espacial puede ser crucial para identificar patrones de cambio en estudios a escala de paisaje que puedan no ser observados con las imágenes satelitales convencionales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aburas, M., Ho, Y., Ramli, M., Ashaari, Z., & S. Ahamad, M. S. (2018). Simulating and monitoring future land-use trends using CA-Markov and LCM models. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 169(1).
- Aguiar, M. R., & Sala, O. E. (1999). Patch structure, dynamics and implications for the functioning of arid ecosystems. *Trends in Ecology and Evolution*, 14(7), 273-277.
- Aguirre, C. A., Olivares, R., & Orellana, A. (2018). Patrones de crecimiento urbano en la metropolización de sistemas urbanos intermedios. El caso de la conurbación La Serena - Coquimbo. *12º Congreso Internacional Ciudad y Territorio Virtual*. Mendoza.
- Amato, F., Tonini, M., Murgante, B., & Kanevski, M. (2018). Fuzzy definition of Rural Urban Interface: An application based on land use changescenarios in Portugal. *Environmental Modelling and Software*.
- Azcón-Bieto, J., Fleck, I., Aranda, X., & Gómez-Casanovas, N. (2013). Fotosíntesis, factores ambientales y cambio climático. En J. Azcón-Bieto, & M. Talón, *Fundamentos de fisiología vegetal* (págs. 247-265).
- Belmonte, F., & Romero, A. (1998). La cubierta vegetal en las regiones áridas y semiáridas: consecuencias de la interceptación de la lluvia en la protección del suelo y los recursos hídricos. *Norba Revista de geografía*(10), 9-22.
- Benavidez-Silva, C., Jensen, M., & Pliscoff, P. (2021). Future Scenarios for Land Use in Chile: Identifying Drivers of Change and Impacts over Protected Area System. *Land*, 10(4).
- Billups, S., & Burke, M. (1999). *Influence of Canopy Density on Ground Vegetation in a Bottomland Hardwood Forest*. Forest Service, Southern Research Station, U.S. Department of Agriculture, Asheville, NC.
- Borsdorf, A. (2003). Cómo modelar el desarrollo y la dinámica de la ciudad latinoamericana. *EURE*, 29(86), 37-49.
- Briceño, F. (2005). Las cadenas de Markov en el análisis de cambios y asignación de usos de la tierra. *Revista Geográfica Venezolana*, 46(1), 35-45.
- Bustamante, R. O. (2009). Dispersión de semillas y demografía de las plantas en un contexto de variabilidad ambiental: el rol de los frugívoros sobre el reclutamiento de *Cryptocarya alba* (Lauraceae) en el matorral de Chile central. En R. Medel, M. A. Aizen, & R. Zamora, *Ecología y evolución de interacciones planta-animal* (págs. 233-247). Santiago de Chile: Universitaria.
- Cavieres, L. A., Mihoc, M., Marticorena, A., Marticorena, C., Mattei, O., & Squeo, F. A. (2001). Determinación de áreas prioritarias para la conservación análisis de parsimonia de endemismos (PAE) en la flora de la IV Región de Coquimbo. En F. A. Squeo, G. Arancio, & J. Gutiérrez, *Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios*

Prioritarios para su Conservación: Región de Coquimbo. La Serena, Chile: Ediciones Universidad de La Serena.

- CEPF. (2016). *Critical Ecosystem Partnership Fund*. Obtenido de Explore the biodiversity hotspots: <https://www.cepf.net/our-work/biodiversity-hotspots>
- Concepción, E. D. (2022). Expansión urbana o cómo el suelo urbanizado se dispersa por el paisaje: Implicaciones para la conservación de la biodiversidad. *Ecosistemas*, 31(1).
- Díaz-Pacheco, J., & Hewitt, R. (2013). Modelado de cambios de usos de suelo urbano a través de neuronales artificiales. Comparando dos aplicaciones software. *GeoFocus*.
- Escobar, M., & García, M. (2017). Camanchaca. Flujos etnonímicos y neblineros en la costa norte de Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*(68), 11-32.
- Espinosa, L. (2019). Reflexiones sobre Antropoceno y Colapso. *Azafea*, 21, 11-31.
- Espinoza, C. (2018). Los Instrumentos de Planificación Territorial (IPT) y su aporte al ordenamiento territorial sostenible del territorio. *Tiempo y Espacio*(41), 52-72.
- Europa, C. d. (1983). Carta Europea de Ordenación del Territorio. *Conferencia Europea de Ministros Responsables de la Ordenación del Territorio*. Torremolinos, España.
- Ferrol, J. (1986). La ordenación del territorio desde una crítica ecológica: aproximación" al Plan Especial de protección del medio físico de la provincia de Almería". *Boletín del Instituto de Estudios Almerienses, Ciencias*(6), 81-112.
- Folchi, M. (2001). La insustentabilidad de la industria del cobre en Chile: los hornos y los bosques durante el siglo XIX. *Mapocho*(49), 149-175.
- Gross, P. (1998). Ordenamiento Territorial: manejo de los espacios rurales. *EURE*, 24(73), 116-118.
- Gunderson, L. H. (2000). Ecological Resilience—In Theory and Application. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 31, 425-439.
- Gurrutxaga, M., & Lozano, P. (2006). Efectos de la fragmentación de hábitats y pérdida de conectividad ecológica dentro de la dinámica territorial. *Polígonos: Revista de geografía*(16), 35-54.
- Gutiérrez, J. R., & Squeo, F. A. (2004). Importancia de los arbustos en los ecosistemas semiáridos de Chile. *Ecosistemas*, 13(1), 36-45.
- Hamad, R., Balzter, H., & Kolo, K. Y. (2018). Predicting Land Use/Land Cover Changes Using a CA-Markov Model under Two Different Scenarios. *Sustainability*, 10(10).
- Ibáñez, S., & Sandoval, A. (datos no publicados). *Actualización Plan de Recuperación, Conservación y Gestión del Lucumillo*.
- Interior, S. d. (2021). *Decreto 469, Política Nacional de Ordenamiento Territorial*.

- Jiménez, V., Hidalgo, R., Campesino, J.-A., & Alvarado, V. (2018). Normalización del modelo neoliberal de expansión residencial más allá del límite urbano en Chile y España. *EURE*, 44(132), 27-46.
- Lagos, V., Torres, J. M., & Noton, C. (2001). Conservación de la Diversidad Biológica: El Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE) como Herramienta de Gestión para la Región de Coquimbo. En F. A. Squeo, G. Arancio, & J. R. Gutiérrez, *Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios Prioritarios para su Conservación: Región de Coquimbo*. La Serena, Chile: Ediciones Universidad de La Serena.
- Lambin, E. F. (1997). Modelling and monitoring land-cover change processes in tropical regions. *Progress in Physical Geography*, 21(3), 375-393.
- Larraguibel-González, C., Boric-Bargetto, D., Celis-Diez, J. L., Figueroa-Sterquel, R., & Torres-Pérez, F. (2021). Diferencias en el ensamble de micromamíferos entre áreas con distinto grado de protección del sitio Prioritario los Molles-Pichidanguí. *Revista de geografía Norte Grande*(80), 391-415.
- Leija, E. G., Valenzuela, S. I., Valencia, M., Jiménez, G., Castañeda, G., Reyes, H., & Mendoza, M. E. (2020). Análisis de cambio de cobertura vegetal y uso de suelo en la región centro-norte de México. El caso de la cuenca baja del río Nazas. *Ecosistemas*, 29(1).
- Loayza, A. P., Carvajal, D. E., García-Guzmán, P., R., Gutierrez, J., & Squeo, F. A. (2014). Seed predation by rodents results in directed dispersal of viable seed fragments of an endangered desert shrub. *ECOSPHERE*, 5(4), 1-9.
- Loayza, A. P., Luna, C. A., & Calviño-Cancela, M. (2020). Predators and dispersers: Context-dependent outcomes of the interactions between rodents and a megafaunal fruit plant. *Sci Rep*, 10.
- Luebert, F., & Pliscoff, P. (2017). *Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile*. Editorial Universitaria.
- Mahecha, A. G., & Lugo, L. J. (2019). *Modelo predictivo de la dinámica espacio-temporal del Bosque Altoandino en el Municipio de Gutiérrez, Cundinamarca, en un escenario de 20 años*. Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Especialista en Sistemas de Información Geográfica.
- Martínez, L. B., & Pugnaire, F. I. (2009). Interacciones entre las comunidades de hongos formadores de micorrizas arbusculares y de plantas. Algunos ejemplos en los ecosistemas semiáridos. *Ecosistemas*, 18(2), 44-54.
- Martínez-Valderrama, J., Guirado, E., & Maestre, F. T. (2021). Desertificación: nuevos enfoques para un viejo problema. *Ecosistemas*, 30(3).
- Massiris, A. (2002). Ordenación del territorio en América Latina. *Scripta Nova: revista electrónica de geografía y ciencias sociales*, 4(125).
- McHugh, M. L. (2012). Interrater reliability: the kappa statistic. *Biochem Med (Zagreb)*, 22(3), 276-282.

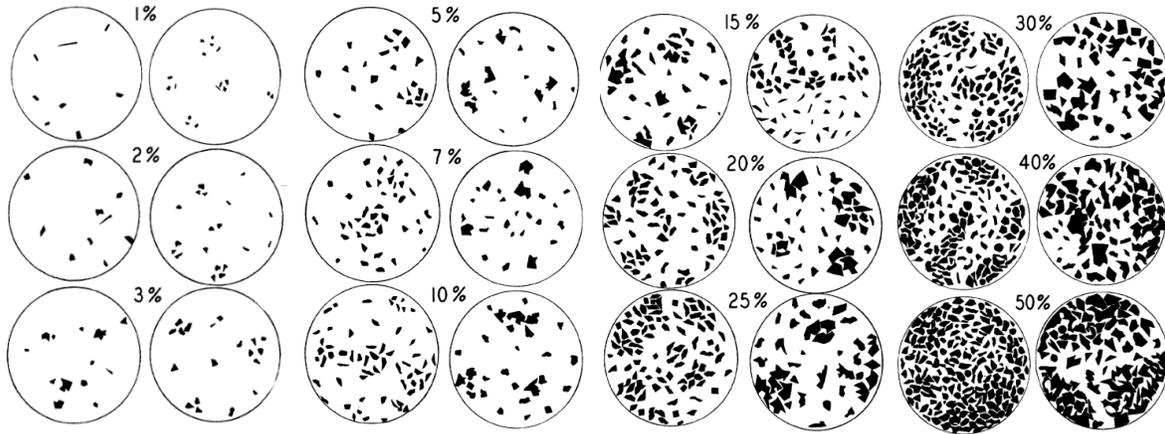
- Moscoso, C. (2007). *Cambios en los usos y coberturas de suelo y sus efectos sobre la escorrentía urbana*. Memoria para optar al título de Geógrafo.
- Muñoz, M., Núñez, H., & Yáñez, J. (1996). *Libro Rojo de los Sitios Prioritarios para la Conservación de la Diversidad Biológica en Chile*. Santiago, Chile: CONAF.
- Muñoz, P. (2013). *Apuntes de Teledetección: Índices de vegetación*. Centro de Información de Recursos Naturales.
- Muñoz-Pedrerros, A., Fletcher, S., Yáñez, J., & Sánchez, P. (2010). Diversidad de micromamíferos en tres ambientes de la Reserva Nacional Lago Peñuelas, Región de Valparaíso, Chile. *Gayana (Concepción)*, 71(1), 1-11.
- Muñoz-Pedrerros, A., Murua, R., & González, L. (1990). Nicho ecológico de micromamíferos en un agroecosistema forestal de Chile central. *Revista Chilena de Historia Natural*, 63, 267-277.
- Novoa, J. E., & López, D. (2001). IV Región: El Escenario Geográfico Físico. En F. A. Squeo, G. Arancio, & J. Gutiérrez, *Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios Prioritarios para su Conservación: Región de Coquimbo*. La Serena, Chile: Ediciones Universidad de La Serena.
- Orellana, A. (2020). Conformación metropolitana desde la fragmentación. El proceso de conurbación del Gran La Serena. *Urbano (Concepción)*, 23(41), 58-83.
- Paeglow, M., Camancho-Olmedo, M. T., & Toribio, J. (2003). Cadenas de Markov, evolución multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelización prospectiva del paisaje. *Geofocus: Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*(3).
- Pavez, E., Lobos, G., & Jaksic, F. (2010). Cambios de largo plazo en el paisaje y los ensambles de micromamíferos y rapaces en Chile central. *Revista chilena de historia natural*, 83(1), 99-111.
- Pointing, S., & Belnap, J. (2012). Microbial colonization and controls in dryland systems. *Nat Rev Microbiol*(10), 551-562.
- Quinteros, C. (2018). El problema técnico-político de los planes reguladores comunales y su desafío a la gobernanza. *Revista Intervención*, 1(8), 35-50.
- Raffestin, C. (2011). *Por una geografía del poder*. (Y. V. Velázquez, Trad.) El Colegio de Michoacan.
- Reynoso, R., Valdez, J. R., Escalona, M. J., & Pérez, M. J. (2016). Cadenas de Markov y autómatas celulares para la modelación de cambio de uso de suelo. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 37(1), 72-81.
- Romero, H., & Vásquez, A. (2005). La comodificación de los territorios urbanizables y la degradación ambiental en Santiago de Chile. *Scripta Nova: revista electrónica de geografía y ciencias sociales*, 9.
- Romero, H., Molina, M., Moscoso, C., Sarricolea, P., Smith, P., & Vásquez, A. (2007). Caracterización de los cambios de usos y coberturas de suelos causados por la expansión urbana de Santiago, análisis estadístico de sus factores explicativos e

- inferencias ambientales. En C. De Mattos, & R. Hidalgo, *Movilidad Espacial y Reconfiguración Metropolitana*. Santiago, Chile.
- Rosa-Mera, C. J.-I., & Monroy-Ata, A. (2006). Mosaicos de vegetación para la restauración ecológica en una zona semiárida. *TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 9(2), 96-100.
- Saldías, G., & Velozo, J. (2012). Distribución geográfica y estado de las poblaciones de *Myrcianthes coquimbensis* (Myrtaceae), especie endémica de Chile, en peligro de extinción. *Chloris chilensis*, Año 15(2).
- Saldías, G., & Velozo, J. (2014). Estudio de la propagación de *Myrcianthes coquimbensis* (Barnéoud) Landrum et Grifo por semillas y esquejes. *Guayana Botánica*, 71(1), 17-23.
- Sánchez-Díaz, M., & Aguirreolea, J. (2013). Transpiración y control estomático. En J. Azcón-Bieto, & M. Talón, *Fundamentos de fisiología vegetal* (págs. 41-56).
- Sandoval, G. (2009). *Análisis del proceso de Cambio y Cobertura de Suelo en la expansión urbana del Gran Valparaíso, su evolución y escenarios futuros*. Memoria para optar al título de Geógrafo.
- Sang, L., Zhang, C., Yang, J., Zhu, D., & Yun, W. (2011). Simulation of land use spatial pattern of towns and villages based on CA-Markov model. *Mathematical and Computer Modelling.*, 54(3-4), 938-943.
- Santos, M. (1999). O Território e o Saber Local: algumas categorias de análise. *Cadernos IPPUR, Ano XIII(2)*, 15-26.
- Serra, M. T., Gajardo, R., & Cabello, A. (1986). *Reichea coquimbensis*. Programa de protección y recuperación de la flora nativa de Chile. Ficha técnica de especies amenazadas. Corporación Nacional Forestal.
- Smith, P., & Romero, H. (2009). Efectos del crecimiento urbano del Área Metropolitana de Concepción sobre los humedales de Rocuant-Andalién, Los Batros y Lengua. *Revista de geografía Norte Grande*(43), 81-93.
- Squeo, F. A., Arancio, G., & Lohengrin A., C. (2001). Sitios Prioritarios para la Conservación de la Flora Nativa con Riesgos de Extinción en la IV Región de Coquimbo, Chile. En F. A. Squeo, G. Arancio, & J. R. Gutiérrez, *Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios Prioritarios para su Conservación: Región de Coquimbo*. La Serena, Chile: Ediciones Universidad de La Serena.
- Squeo, F. A., Arancio, G., Marticorena, C., Muñoz, M., & Gutiérrez, J. R. (2001). Diversidad Vegetal de la IV Región de Coquimbo, Chile. En F. A. Squeo, G. Arancio, & J. Gutiérrez, *Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios Prioritarios para su Conservación: Región de Coquimbo*. La Serena, Chile: Ediciones Universidad de La Serena.
- Sundara Kumar, K., Udaya Bhaskar, P., & Padmakumari, K. (2015). Application of Land Change Modeler for Prediction of future Land Use Land Cover. A case study of Vijayawada City. *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science*, 3(1), 773-783.

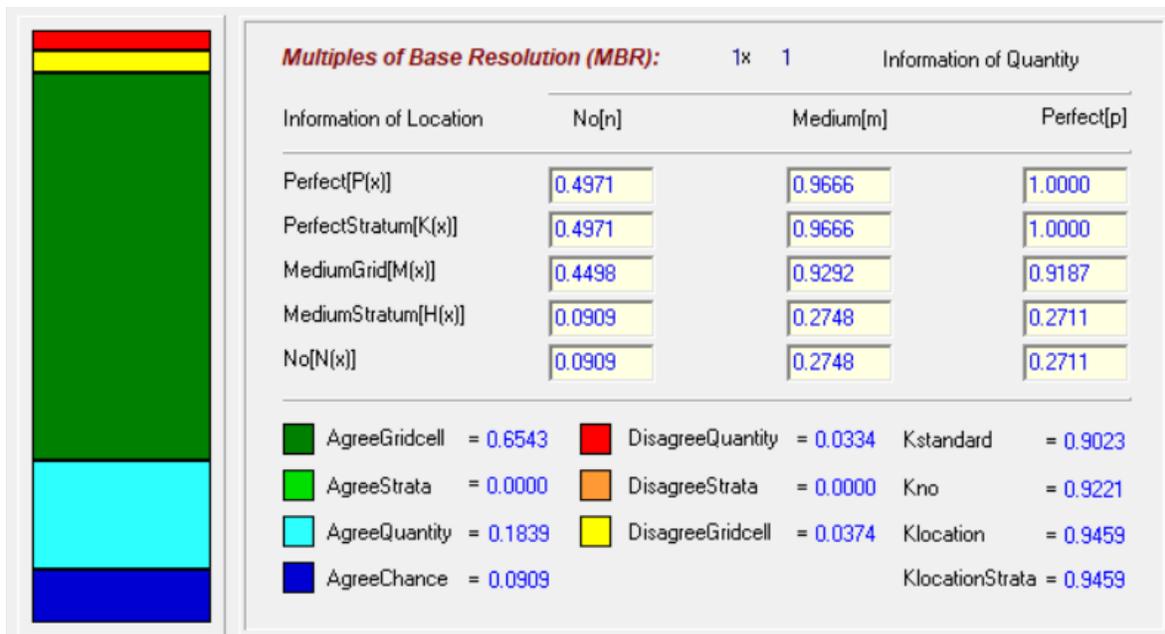
Terry, R. D., & Chilingar, G. V. (1955). Summary of "Concerning some additional aids in studying sedimentary formations" by M. S. Shvetsov. *Journal of Sedimentary Research*, 25(3), 229-234.

Topik, C. (1988). *Plant Association Guide and Management for the Grand Fir Zone: Gifford Pinchot National Forest*. USDA Forest Service Report R6-ECOLTP-006-88. , Pacific Northwest Region, Portland, Oregon.

ANEXOS



Anexo 1. Esquemas utilizados para la clasificación de las coberturas naturales observadas en el área de estudio, Terry & Chilingar (1955).



Anexo 2. Índice Kappa obtenido mediante la comparación entre el año 2022 proyectado y 2022 observado, imagen extraída desde la herramienta VALIDATE disponible en TerrSet.



Anexo 3. Imagen de *Octon degus* obtenida mediante cámara trampa en el sector El Panul. Se observa lo señalado por (Muñoz-Pedrerros, Murua & González, 1990) donde existe una preferencia de hábitats de estratos bajos-medios asociados a sectores arbustivos y rocas. Además, en estos ambientes ha observado el reclutamiento de plántulas de *Myrcianthes coquimbensis* (Loayza, et al. 2014; Loayza, Luna, & Calviño-Cancela, 2020). Imagen cedida por el Movimiento EcoPanul.