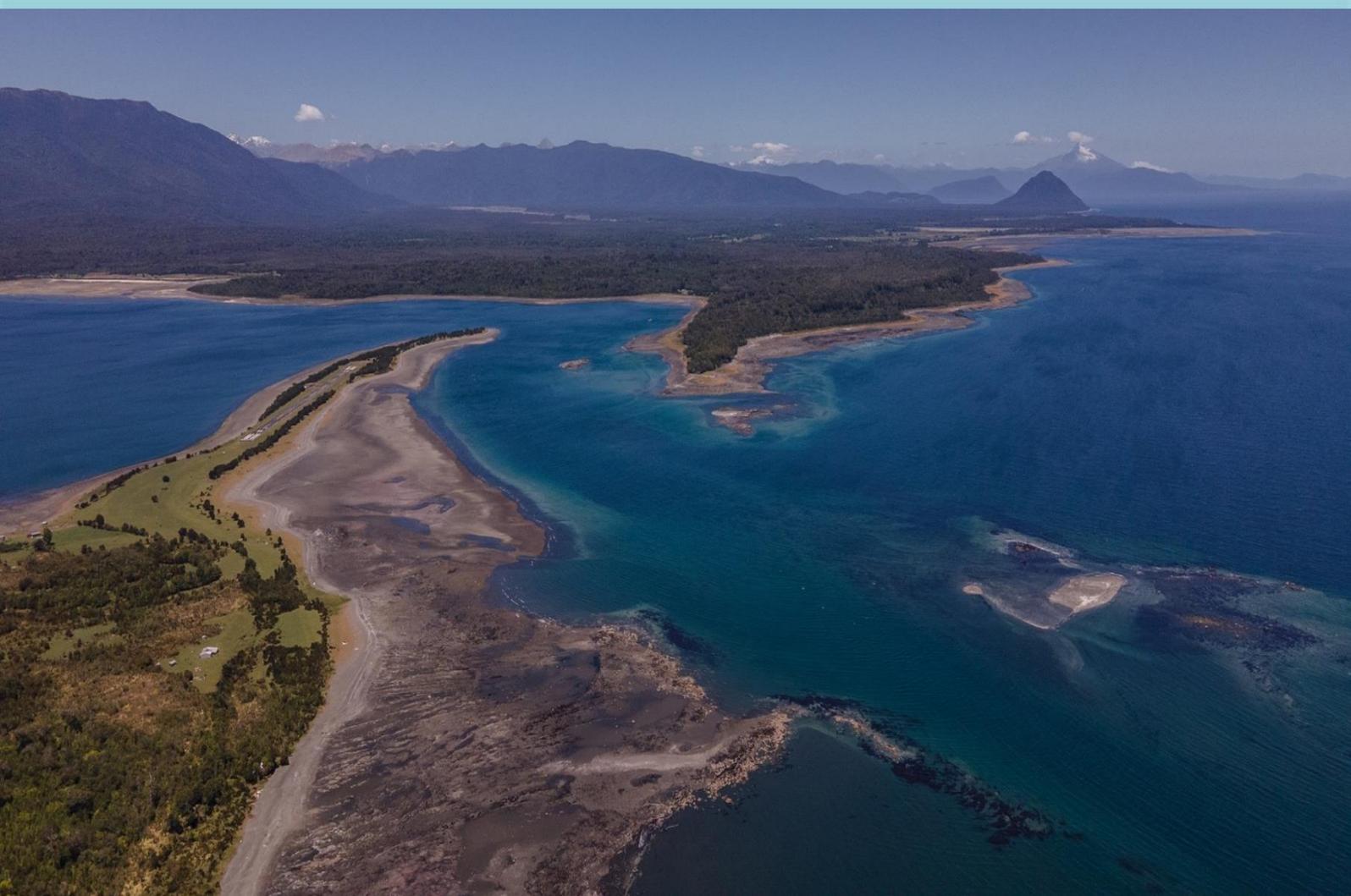


Informe

Identificación de refugios climáticos terrestres y marinos para la biodiversidad en la Patagonia chilena

Identification of terrestrial and marine climatic refugia for biodiversity in Chilean Patagonia

Diciembre, 2022



Programa
**Austral
Patagonia**
Universidad Austral de Chile



Universidad Austral de Chile
Conocimiento y Naturaleza

Identificación de refugios climáticos para la biodiversidad en la Patagonia chilena, tanto en áreas terrestres como marinas, con el fin de identificar la superposición de los potenciales refugios climáticos con las áreas silvestres protegidas. El análisis busca apoyar la identificación de sitios de interés para la conservación, considerando esta nueva variable.

Austral Patagonia es un programa de la Universidad Austral de Chile que **busca mejorar el estatus de conservación** en los ecosistemas terrestres y marinos de la Patagonia chilena.



Programa Austral Patagonia

Autores

Dr. Patricio Pliscoff ^{1,2,3,4}

¹ Departamento de Ecología, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Católica de Chile

² Instituto de Geografía, Facultad de Historia, Geografía y Ciencia Política, Universidad Católica de Chile.

³ Centro de Ecología Aplicada, CAPES-UC, Universidad Católica de Chile.

⁴ Instituto de Ecología y Biodiversidad, IEB-Chile.

Revisión

Dra. María José Martínez, investigadora asociada*

Edición

Dr. César Guala, Director*

Dra. Paulina Lobos, encargada de Ciencias*

Annelore Hoffens, encargada de Comunicaciones*

*Programa Austral Patagonia, Universidad Austral de Chile

Foto

Chaitén – Desertores, crédito Marcelo Mascareño

Cita bibliográfica correcta:

Pliscoff, P. (2022) Identificación de refugios climáticos terrestres y marinos en la Patagonia. Programa Austral Patagonia de Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.

La información contenida en este documento es de propiedad del Programa Austral Patagonia y su uso para fines académicos u otros, debe citar correctamente la fuente.

Email: programaaustralpatagonia@uach.cl

www.programaaustralpatagonia.cl

Tabla de contenido

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 4 |
| 2. METODOLOGÍA | 7 |
| 2.1 ÁREA DE ESTUDIO | 7 |
| 2.2 REFUGIOS CLIMÁTICOS TERRESTRES | 8 |
| 2.2.1 GEODIVERSIDAD | 8 |
| 2.2.2 VELOCIDAD DEL CAMBIO CLIMÁTICO | 9 |
| 2.2.3 VELOCIDAD BIÓTICA | 9 |
| 2.2.4 CÁLCULO FINAL DE REFUGIOS CLIMÁTICOS TERRESTRES | 9 |
| 2.2.5 ANÁLISIS DE VACÍOS | 10 |
| 2.2.6 REFUGIOS CLIMÁTICOS MARINOS | 13 |
| 3. RESULTADOS..... | 16 |
| 3.1 REFUGIOS CLIMÁTICOS TERRESTRES | 16 |
| 3.2 REFUGIOS CLIMÁTICOS MARINOS | 19 |
| 4. DISCUSIÓN | 22 |
| 5. CONCLUSION..... | 23 |
| 6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS..... | 24 |

1. INTRODUCCIÓN

La identificación de áreas prioritarias para la conservación de la biodiversidad es fundamental para definir nuevas áreas de conservación y evaluar aquellas que ya existen en un territorio (Brooks et al., 2006). Esta puede realizarse en base a la definición de los objetos de conservación existentes dentro de un área (especies, ecosistemas, procesos), y/o por la identificación de ecosistemas que actúan como refugios climáticos para la biodiversidad. En efecto, en los últimos años, la identificación de refugios climáticos se ha transformado en una herramienta relevante para definir sitios prioritarios para la conservación de la biodiversidad, transformándose en una herramienta crucial dentro del proceso de planificación sistemática para la conservación (Moilanen et al., 2022). Un ejemplo de ello son los estudios científicos y programas de planificación de conservación realizados en Norteamérica, particularmente Estados Unidos y Canadá, que incluyen definiciones de refugios climáticos (Ramírez et al., 2017; Halofsky et al., 2022). Asimismo, las agencias gubernamentales estatales y federales de California incorporaron mapas de refugios climáticos de vegetación para especies de vertebrados, a la planificación para la reforestación posterior a los incendios forestales (Thorne et al., 2020). Esta experiencia sirvió para definir un proceso de conservación paso a paso que incluye la identificación de los objetivos de gestión, el mapeo de los refugios climáticos utilizando datos físicos y biológicos, y la selección e implementación de acciones para proteger los refugios climáticos identificados y asegurar su mantenimiento en el tiempo a través del monitoreo (Morelli et al. 2016).

Definición de refugio climático

En términos generales, el concepto de refugio corresponde al estado de estar a salvo o protegido de cualquier peligro o dificultad (Morelli et al., 2020). Desde el punto de vista ecológico, se puede entender como aquella área en que las especies y las poblaciones pueden sobrevivir durante largos períodos de tiempo (Ashcroft et al., 2010) o como zonas geográficas que, dadas sus condiciones climáticas o características topográficas, han permitido mantener por largos periodos de tiempo la presencia de especies y poblaciones en diferentes partes del planeta (Selwood et al. 2020). En este sentido la aplicación más conocida del concepto refugio se relaciona con la identificación de los refugios glaciares durante el último máximo glacial (LGM), los cuales permitieron la existencia de linajes evolutivos distintos y la persistencia de la diversidad genética de algunas especies (ejemplos en Villagran, 1991; Mathiasen et al., 2020). Los refugios, por lo tanto, surgen como una cuestión importante no solo para las disciplinas de la ecología y la biogeografía, sino también para la conservación biológica, toda vez que su identificación y protección puede garantizar la subsistencia de las especies en las condiciones actuales y futuras de clima (Keppel et al., 2012; Dai et al., 2019).

Frente a los desafíos impuestos por la aceleración del cambio climático -producido por la acción antropogénica- y los impactos que éste ha generado sobre los ecosistemas y la biodiversidad, la identificación de refugios para la biodiversidad se ha vuelto cada vez más importante. Por ello, la definición original de refugios glaciares se ha ampliado a diferentes escalas temporales y espaciales, entendiéndose actualmente como refugios no solo aquellos lugares relacionados a las antiguas zonas glaciares, sino también a las zonas que posean una alta heterogeneidad ambiental, es decir, presentan condiciones de sitio -relieve y suelo- particulares (Thorne et al., 2020). Emerge, entonces, el concepto de refugio climático para identificar aquellas zonas que permiten aminorar los efectos del cambio climático y garantizar la persistencia de especies, comunidades y ecosistemas (Barrows et al., 2020), propiciando su adaptación a los efectos del cambio climático (Reside et al., 2013). Siendo así, los

refugios climáticos se definen ampliamente como todas aquellas zonas del territorio que proporcionan un grado de protección frente a los efectos actuales del cambio climático, y permiten la persistencia de los recursos físicos, ecológicos o socioculturales (Morelli et al., 2016; Barrows et al., 2020). Desde un punto de vista ecológico, estas áreas actúan como amortiguadores de los impactos del cambio climático.

La distribución de los refugios climáticos puede diferir de las áreas protegidas tradicionales (parques, reservas, santuarios, etc), ya que los criterios que los definen -por ejemplo, la geodiversidad y la velocidad del cambio climático- no han sido considerados en la definición de las áreas prioritarias para la protección a escala global y regional (Stralberg, 2020a). La no coincidencia de cobertura espacial entre las áreas protegidas y los refugios climáticos se vuelve crítica de relevar para ecosistemas particularmente sensibles al cambio climático, como son los océanos. En ellos se han identificado efectos del cambio climático en forma aún más explícita que en la superficie terrestre, debido a la mayor sensibilidad de algunos elementos de gran relevancia, como pueden ser los arrecifes de coral. Estos, entre muchos otros, están dando cuenta en forma dramática del impacto que tiene el aumento de la temperatura del mar (McWhorter et al. 2022). La identificación de refugios climáticos en zonas marinas, por lo tanto, se vuelve sumamente relevante para priorizar áreas de protección que permitan establecer acciones de conservación en zonas específicas, adelantándose a los impactos o amenazas en el corto y mediano plazo. Además, al aplicar enfoques conjuntos para la identificación de refugios climáticos en ambientes terrestres y marinos, se puede explorar la interconexión que se da en el ambiente costero, que es uno de los más intervenidos por la acción del hombre por la extracción de recursos en el mar, así como por el avance en el cambio de uso del suelo terrestre.

Considerando todo lo anterior es que, a través del presente estudio, se hace un ejercicio de determinación espacial de refugios climáticos para la Patagonia chilena, tanto del ámbito terrestre como marino, con miras a aportar a la identificación de zonas críticas para la conservación, y a las políticas públicas en materia de mitigación y/o adaptación el cambio climático. Esto, ya que la importancia de la identificación de refugios climáticos en la Patagonia es una Solución Basada en la Naturaleza, que puede ser integrada a las Contribuciones Nacionales Determinadas (NDC), y/o ser incorporada en diversas normativas como la Ley Marco de Cambio Climático, el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC), el Plan Nacional de Cambio Climático y Biodiversidad (PNACC-BIO), o bien dentro de la ley que creará el nuevo Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas (SBAP).

Este trabajo se realizó a solicitud del Programa Austral Patagonia de la Universidad Austral de Chile, como parte de su esfuerzo por proveer análisis y datos relevantes para fortalecer el sistema de protección para los ecosistemas de la Patagonia chilena. Asimismo, este estudio corresponde al seguimiento de una recomendación realizada en el informe del Programa Austral Patagonia (2020) "Patagonia Refugio Climático: propuesta de soluciones basadas en la naturaleza para las contribuciones nacionales antes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático" (Valencia et al., 2020), así como de las recomendaciones presentadas en el libro "Conservación en la Patagonia chilena: evaluación del conocimiento, oportunidades y desafíos" (Castilla et al., 2021).

Sobre la identificación de refugios climáticos

La identificación de refugios climáticos que representan la heterogeneidad ambiental (Parks et al., 2020) se aborda con modelos digitales de elevación que permiten la caracterización de la topografía a distintas escalas. Cuando se trata de escalas amplias (sobre 1 km²) se habla de macro refugios, en tanto a escalas más finas, que posibilitan el mapeo de áreas de topografía complejas, hablamos de micro refugios (Stralberg et al., 2020b). Ambas escalas pueden ser complementarias, ya que se centran en la representación de diferentes procesos ecológicos, por lo tanto, su análisis conjunto puede presentar un enfoque más robusto (Michalak et al., 2020).

A su vez, los refugios climáticos deben entenderse como gradientes espaciales y temporales, y no como puntos fijos y discretos en el espacio. Bajo esta lógica, el enfoque de refugios climáticos se presenta como el de mayor utilidad para poder frenar el impacto del cambio climático, al resguardar zonas espacialmente heterogéneas y dinámicas (Michalak et al., 2017; Michalak et al., 2018). Asimismo, de ser incluidas en acciones de conservación efectivas, este enfoque también permitiría frenar el impacto del cambio climático de forma sostenible en el tiempo (Morelli et al., 2020).

Conocer la relación entre las áreas protegidas y los refugios climáticos resultaría clave en la planificación para la conservación, ya que los vacíos de representación de estos refugios, dentro y fuera de las áreas protegidas, puede determinar la priorización de acciones de conservación a corto plazo para 1) proteger refugios climáticos que están fuera del sistemas de protección actual, o 2) establecer planes de manejo adecuados para aquellos refugios que sí coinciden con áreas protegidas establecidas.

Objetivos del estudio

Con todo lo anterior, este trabajo se centra en la hipótesis de que los refugios climáticos pueden complementar y mejorar la representatividad ecosistémica dentro de la red de áreas protegidas de la Patagonia, incorporando la dimensión espacial del cambio climático en su planificación. En función de ello los objetivos específicos de este estudio son:

- 1.-Identificar los refugios climáticos terrestres y marinos en la Patagonia, combinando la biodiversidad, la geodiversidad y las variables climáticas.
- 2.-Realizar un análisis de vacíos de conservación entre los refugios climáticos identificados y la red de áreas protegidas marinas y terrestres.

2. METODOLOGÍA

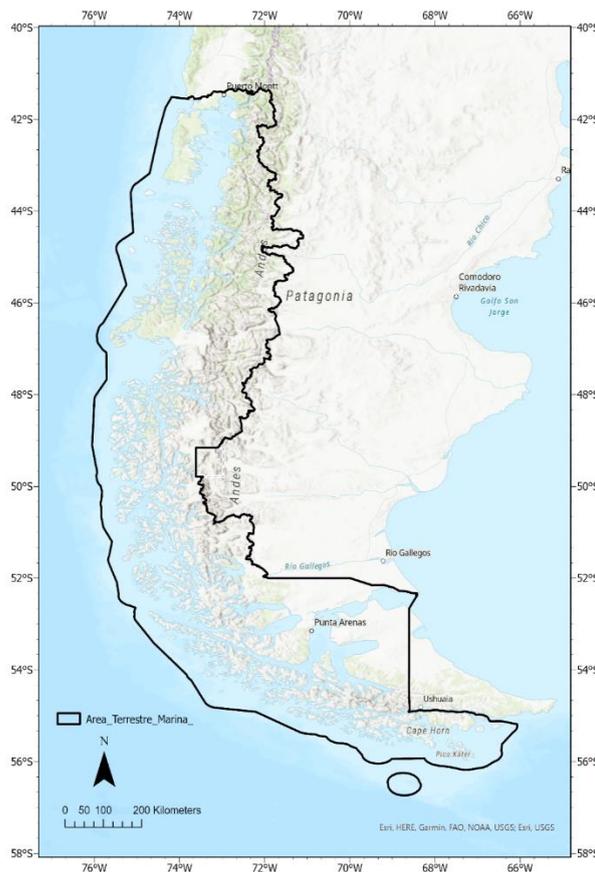
El presente estudio utilizó un enfoque de identificación de refugios climáticos que incorpora, en el ámbito terrestre, elementos de geodiversidad (posición topográfica, carga de calor), diversidad climática y procesos sobre el espacio (velocidad del cambio climático, velocidad biótica). En el ámbito marino, en tanto, se consideraron los cambios futuros en la temperatura de la superficie del mar, la productividad primaria y la clorofila, como descriptores de zonas con mayor potencial para mantener la diversidad de especies y comunidades.

En función de su aplicación como herramienta de planificación de conservación de la biodiversidad, los refugios climáticos identificados fueron evaluados según su correspondencia espacial con las Áreas Protegidas del Estado, así como con la distribución de los bosques primarios, en el ámbito terrestre, y bosques de macroalgas, en el marino. Esto, debido a que tanto los bosques primarios como los bosques de macroalgas son atributos que indican prístinidad en los respectivos ecosistemas.

2.1 Área de estudio

El área de estudio se definió desde los 41° de latitud sur hasta los 56° de latitud sur, correspondiente al límite terrestre de la Patagonia chilena. El límite norte del área terrestre estudiada está definido específicamente por los límites de las comunas de Maullín, Puerto Montt y Cochamó, en un sentido longitudinal de mar a cordillera. El área marina en estudio, en tanto, incluye la ecorregión marina chilense y ecorregión marina de fiordos y canales (Spalding et al., 2007), considerando un área buffer de 12 millas desde la línea de costa (Figura 1).

Figura 1. Área de estudio



2.2 Refugios climáticos terrestres

Los refugios climáticos terrestres se definieron utilizando tres tipos de criterios espaciales: la geodiversidad, la velocidad del cambio climático y la velocidad biótica, todos ellos utilizados en otros estudios para la definición de refugios climáticos (Michalak et al., 2020). La geodiversidad (diversidad ambiental) fue utilizada en Carroll et al. (2017), así como en Stralberg et al. (2018), aunque asociada a dos criterios climáticos diferentes: velocidad de la tasa de cambio climático, en el caso de Carroll et al. (2017); y velocidad biótica en el caso de Stralberg et al. (2018).

2.2.1 Geodiversidad

La geodiversidad a nivel de Chile continental se calcula a través de tres métricas de diversidad: topográfica, ecotípica y climática (Figura 2), siguiendo la metodología presentada en Carroll et al. (2017).

En este estudio la diversidad topográfica se calculó utilizando el modelo de elevación global SRTM v4.1 (Farr et al., 2007) de 90 metros, transformado a la escala de 100 metros a través de la herramienta de remuestreo en ArcGis ArcMap, para la simplificación de los cálculos de superficie. Los datos de elevación del modelo SRTM se convirtieron en el índice de carga térmica (HLI) (McCune & Keon, 2002) y en el índice de posición topográfica (TPI) (Stralberg et al., 2020a). El primero -índice de carga térmica (HLI)- se trata de una métrica basada en la pendiente, la exposición y la latitud, y es una estimación del potencial de radiación incidente que se relaciona con la diversidad de formas del terreno, de una manera diferente a la elevación. El índice de posición topográfica (TPI), en tanto, refleja la variabilidad del terreno, definiendo un gradiente desde zonas con mayor a menor pendiente. La diversidad de ambos índices se calculó usando el índice de Shannon entre pares de celdas dentro de una vecindad espacial definida por ventanas móviles, siguiendo la metodología descrita por Ackerly et al. (2010). Para la aplicación del índice de Shannon se utilizó el paquete de R rasterdiv (Rocchini et al., 2021).

La diversidad ecotípica se define como una combinación de variables bioclimáticas, litología y tipos de uso del suelo. Para esta investigación se consideró la clasificación global de unidades ecológicas terrestres desarrollada por Sayre et al. (2014).

Además, se consideró el cálculo de una métrica de diversidad climática para tener un elemento complementario las variables anteriores que se basan únicamente en elementos de la superficie terrestre. Para ello se utilizaron las superficies climáticas generadas para el sur de Sudamérica y presentadas en Pliscoff et al. (2014), cuyos datos representan 19 variables bioclimáticas obtenidas a partir de variables mensuales de temperatura y precipitación con una resolución de 1 km para el periodo 1950-2000. Se generó un análisis de componentes principales con las 19 variables bioclimáticas para eliminar la colinealidad. Para representar la diversidad climática, se calculó el índice de diversidad de Shannon con el primer componente obtenido del análisis anterior, utilizando los mismos pasos aplicados en la definición de la diversidad topográfica. Finalmente, estas variables de geodiversidad fueron re-escaladas en valores de 0 a 1 y se promediaron para obtener una capa final.

2.2.2 Velocidad del cambio climático

La velocidad del cambio climático corresponde a la división entre la tasa temporal de cambio climático (temperatura y/o precipitación) y la tasa de variabilidad climática en un gradiente espacial (Loarie et al., 2009). Este cálculo puede expresarse desde el presente hacia el futuro (velocidad hacia adelante) o desde el futuro hacia el tiempo presente (velocidad hacia atrás) (Figura 3), siendo esta última la forma de identificar zonas susceptibles de ser refugios climáticos (Carroll et al., 2015).

En el caso de este análisis, se calculó la velocidad hacia atrás de la temperatura promedio anual. Las superficies climáticas de temperatura promedio anual se obtuvieron del conjunto de datos Worldclim 2.1 (<http://worldclim.org>) (Fink & Hijmans, 2017); la temperatura actual corresponde al periodo de tiempo 1980-2010; y para la temperatura futura se seleccionó la variable desde un modelo de circulación global (HadGEM3-3GC31-LL) bajo un escenario de proyección pesimista (SSP5 8.5) para el periodo 2080-2100. El cálculo de la velocidad hacia atrás se realizó con el paquete de R vocc (García Molinos et al., 2019).

2.2.3 Velocidad biótica

Además, se calculó la velocidad biótica hacia atrás, siguiendo a Carroll et al. (2015). Este concepto corresponde a la aplicación de la velocidad del cambio climático, pero utilizando los modelos de distribución de especies como elemento para definir el gradiente espacial. Este análisis se realiza utilizando modelos de distribución de especies de flora, basados en los modelos generados para todo Chile y presentados en el artículo sobre la flora mediterránea de Chile (Fuentes-Castillo et al., 2019). El gradiente espacial se calculó utilizando los modelos actuales, considerando el escenario de distribución futura (para el periodo 2070-2100) y el escenario de emisiones de gases de efecto invernadero más pesimista RCP 8.5. La suposición subyacente, es que las distancias más largas (valores más altos de velocidad de retroceso) representan un mayor potencial para servir de refugio climático. Para el cálculo de velocidad biótica hacia atrás, se aplicó el mismo enfoque metodológico que para medir la velocidad del cambio climático, utilizando el paquete de R vocc (García Molinos et al., 2019). Finalmente, se seleccionaron las capas que representan el gradiente climático espacial y la velocidad biótica hacia atrás para representar los refugios climáticos (Figura 3).

2.2.4 Cálculo final de refugios climáticos terrestres

La identificación de las áreas con mayor capacidad de ser refugios climáticos en la Patagonia chilena se hizo utilizando un enfoque de priorización espacial con el software Zonation 5 (Moilanen et al. 2022), que es un programa usado ampliamente a nivel mundial para identificar los sitios que concentran mayor valor a partir de un conjunto de elementos que se expresan en el espacio geográfico. En este caso, se combinaron las capas correspondientes a geodiversidad, velocidad del cambio climático y velocidad biótica (Figura 5) y, a través de un algoritmo de priorización, fue posible relevar las áreas geográficas que concentran la mayor coincidencia espacial de los valores expresados en estas capas.

En este estudio se utilizó el algoritmo CAZMAX de Zonation y a las tres capas antes mencionadas se les dio el mismo peso. Una vez obtenida la capa priorizada (ranking espacial), se transformó el ranking a deciles, para identificar las áreas con mayor valor como refugio climático. En este ranking se considera que las zonas con mayor potencial de refugios climáticos son aquellas dentro del 30 decil superior, es

decir con más de 70% de probabilidad, y es representado en una escala de colores rojos para alto potencial y verde para zonas de bajo potencial como refugio climático.

2.2.5 Análisis de vacíos

Como paso final, la capa de refugios climáticos marinos y terrestres se sobrepuso con la red de Áreas Silvestres Protegidas del Estado, para identificar aquellas áreas de alto valor como refugios climáticos que no se encuentran representadas dentro de esta red, por un lado, y aquellas que sí están dentro de un área protegida establecida. Para este análisis de vacíos se consideraron 58 áreas silvestres protegidas (ASPE)¹ correspondientes a Monumentos Nacionales, Santuarios de la Naturaleza, Reservas Nacionales y Parques Nacionales en la Patagonia chilena.

Además, se realizó una sobreposición de la capa de bosques primarios, utilizando la base de datos generada por Astorga et al. (2021), para identificar las zonas de coincidencia entre bosque primario y áreas con mayor potencial como refugios climáticos.

¹ <https://www.parquesnacionales.cl/que-es-el-snaspe/#1519269133272-d49c00bc-2e5a>

Figura 2. Variables definidas para el cálculo de la geodiversidad (diversidad topográfica)

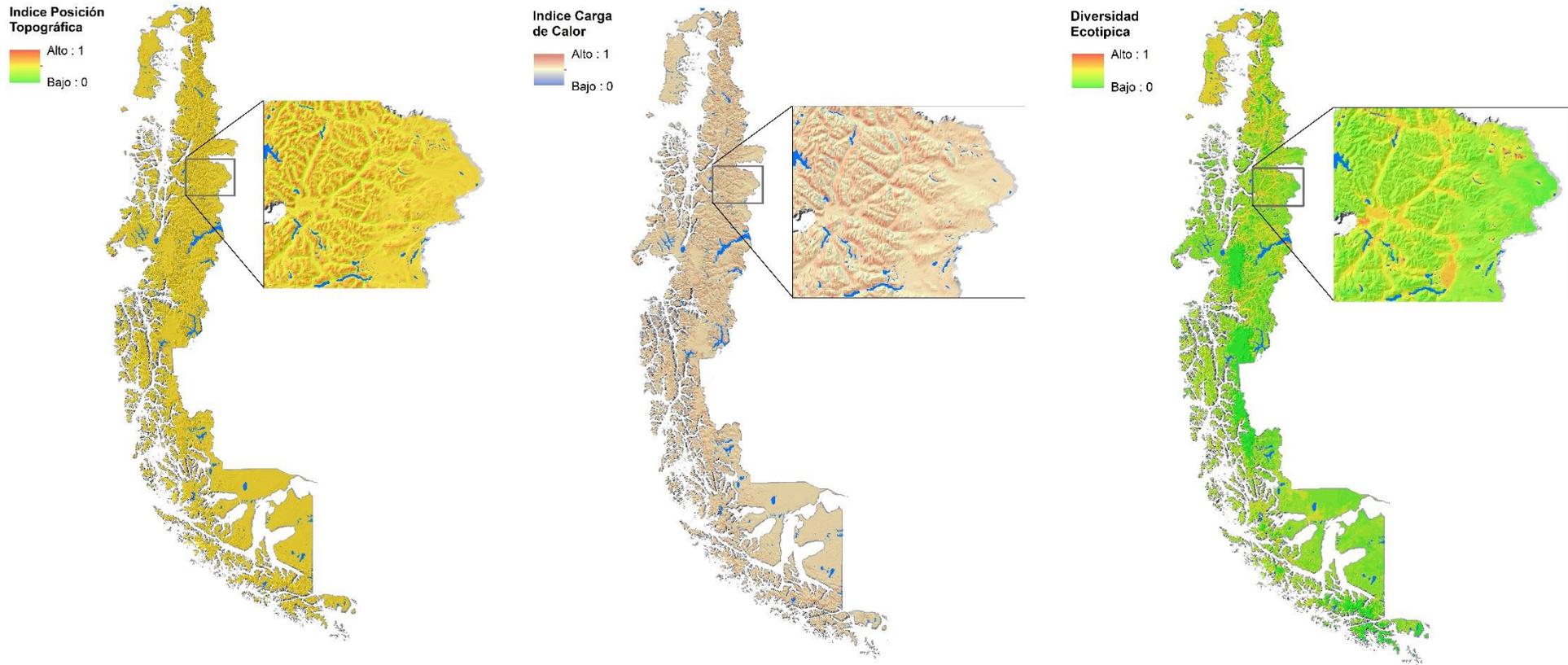
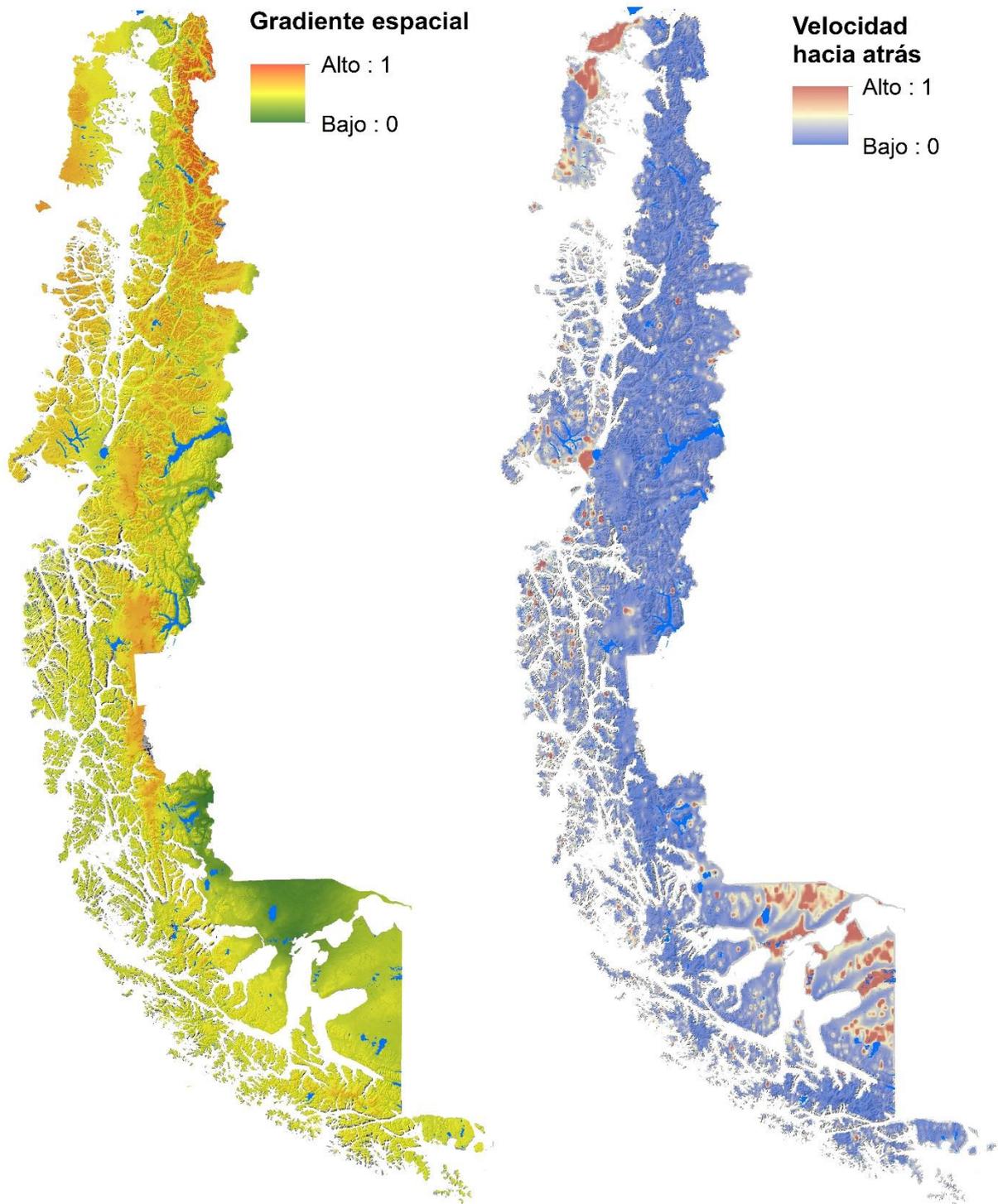


Figura 3. Variables definidas para caracterizar la velocidad biótica (izquierda) y velocidad de cambio climático (derecha).



2.2.6 Refugios climáticos marinos

En el ámbito marino, las áreas de alto valor como refugios climáticos se identificaron a partir de la información disponible en la base de datos BIO-ORACLE (Assis et al., 2018), que tiene una resolución espacial de aproximadamente 10 km. Se seleccionaron las capas de temperatura superficial actual y futura del mar, las capas de productividad primaria y de clorofila.

Las áreas con estabilidad climática se identificaron calculando la diferencia entre la capa de temperatura marina superficial futura y actual. Los valores más bajos indican mayor estabilidad climática futura y, por lo tanto, mayor potencialidad de ser refugio climático (Kyrioti et al., 2021).

Una vez obtenida la capa de estabilidad futura, se aplicó el mismo enfoque de priorización espacial realizado en el ámbito terrestre con el software Zonation 5, combinando tres elementos: la estabilidad climática futura, la productividad primaria y la clorofila (Figura 4). Las variables y fuentes de información se presentan en la Tabla 1. Al igual que en el ámbito terrestres, una vez obtenido el ranking de priorización, se consideró que las áreas con los mayores deciles correspondían a refugios climáticos. Estos, a su vez, se analizaron en función de su correspondencia con la red de áreas marinas protegidas (AMP), los que corresponden a Parques Marinos, Reservas Marinas, Áreas Costeras de Múltiples Usos y las porciones de mar de Parques Nacionales y Reservas Nacionales; y de bosques de macroalgas, según la base de datos presentada por Mora-Soto et al. (2021) para fiordos y canales de la Patagonia

Tabla 1. Variables y fuentes de información utilizadas para la definición de los refugios climáticos terrestres y marinos.

| | Variable | Fuente |
|---------------------------------------|----------------------------------|---|
| Refugios climáticos terrestres | | |
| Geodiversidad | Posición topográfica | Modelo de elevación |
| | Carga de calor | Modelo de elevación |
| | Diversidad climática | Superficies climáticas (Pliscoff et al. 2014) |
| Velocidad de cambio climático | Superficies climáticas actuales | Superficies climáticas (Pliscoff et al. 2014) |
| | Superficies climáticas futuras | Superficies climáticas (Pliscoff et al. 2014) |
| Velocidad biótica | Modelos de distribución actuales | Fuentes-Castillo et al. 2019 |
| | Modelos de distribución futuros | Fuentes-Castillo et al. 2019 |
| Refugios climáticos marinos | | |
| Climáticas | Temperatura Superficial actual | BioOracle (Assis et al. 2018) |
| | Temperatura Superficial futura | BioOracle (Assis et al. 2018) |
| Biofísicas | Clorofila | BioOracle (Assis et al. 2018) |
| | Productividad primaria | BioOracle (Assis et al. 2018) |

Figura 4. Variables definidas para caracterizar los refugios marinos en la Patagonia

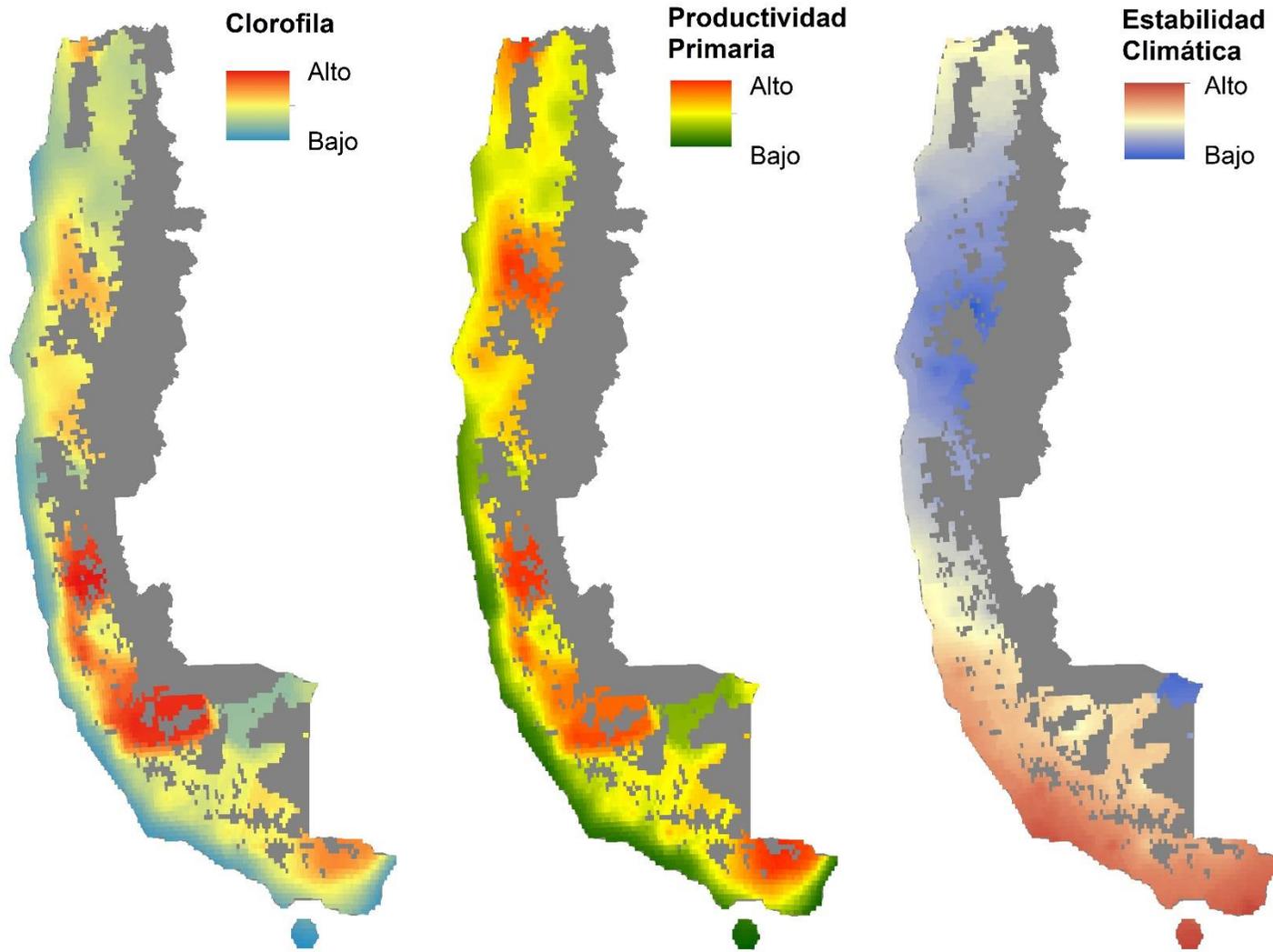
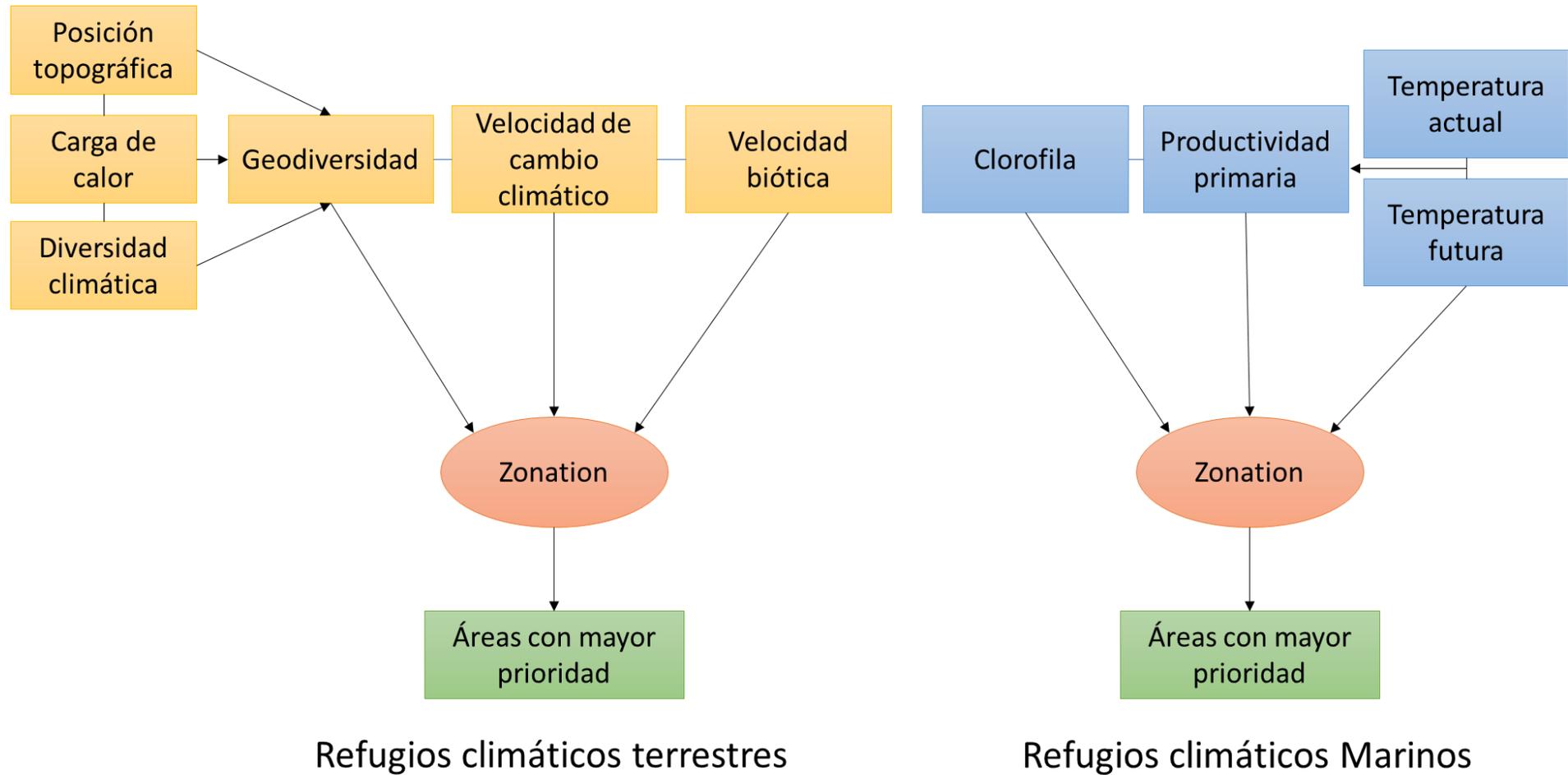


Figura 5. Esquema metodológico para la identificación de refugios climáticos.



3. RESULTADOS

3.1 Refugios climáticos terrestres

La combinación de los patrones de geodiversidad, velocidad de cambio climático y velocidad biótica (Figura 2), arrojan como resultados que las áreas con mayor potencial de refugio climático se distribuyen a lo largo de toda la Patagonia, pero se concentran en algunos sectores: Chiloé continental y Chiloé Insular, en la Región de los Lagos; zona interior entre el área costera y la zona oriental de estepas, en la Región de Aysén; extremo continental sureste y zona norte de la isla de Tierra del Fuego, en la Región de Magallanes. En esta última región se identificó un menor número de áreas con potencial de refugio climático.

Superposición con áreas protegidas

Al analizar la sobreposición de los refugios climáticos con las áreas protegidas terrestres, se observa que la gran mayoría de éstas se traslapa con zonas de gran potencial como refugio climático. Así, 46 áreas protegidas terrestres, de un total de 58 estudiadas, poseen zonas rankeadas dentro del 30% de aquellas con mayor potencial de ser refugio climático. De estas 46, 21 unidades tienen algún sector rankeado dentro del 10% de mayor potencial como refugio, es decir, zonas que arrojan valores entre el 90 y 100 % del ranking de priorización total. Las unidades que tienen mayor potencial como refugio climático, por su porcentaje de máxima prioridad, son el Monumento Natural Laguna de Los Cisnes, en Aysén; el Parque Nacional Hornopirén, la Reserva Nacional Futaleufú y Reserva Nacional Lago Palena, en la Región de Los Lagos (ver Tabla 2). Sin embargo, es importante destacar que otras áreas silvestres protegidas también cuentan con una alta superficie con potencial de refugio climático terrestre, como PN Bernardo O’higgins, PN Laguna San Rafael, PN Pumalín, RN Katalalixar, y RN Guaitecas.

Superposición con bosques primarios

Respecto a los bosques primarios de la Patagonia chilena, estos se correlacionan espacialmente con las áreas identificadas con mayor potencial de refugio climático (Figuras 6 y 7). El 40 % de la superficie total de bosque primario coincide con zonas rankeadas dentro del 30% de mayor potencial de ser refugio climático.

Figura 6. Presencia de bosques primarios en las categorías de priorización para la identificación de refugios climáticos en la Patagonia. Mayor ranking indica mayor potencial de refugio.

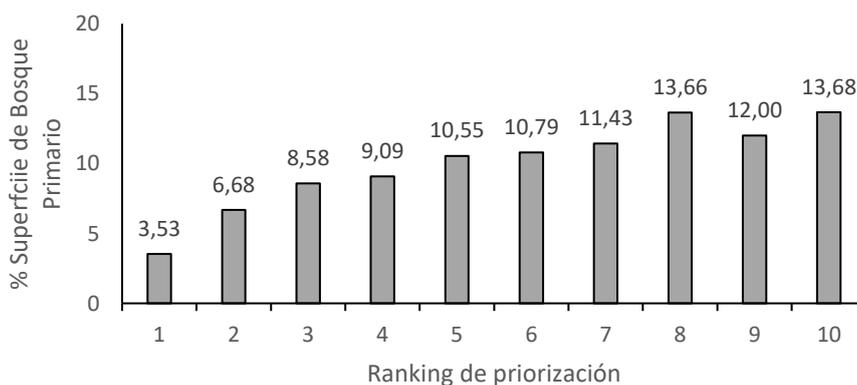
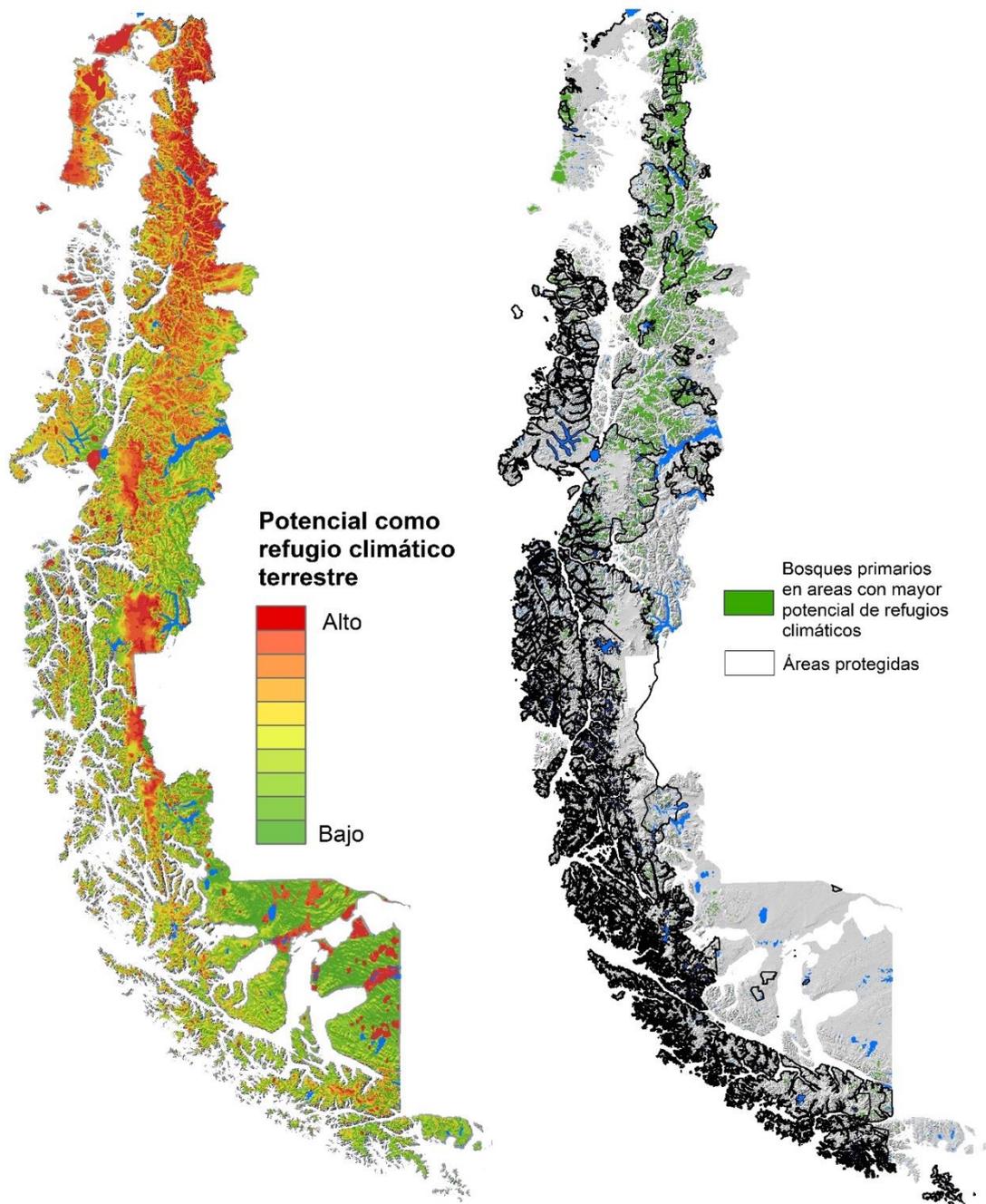


Tabla 2. Distribución en las áreas protegidas terrestres de la Patagonia (Parques Nacionales, Reservas Nacionales y Santuarios de la Naturaleza). Se señalan las áreas identificadas con mayor potencial como refugio climático, el porcentaje de prioridad y la superficie total de las áreas protegidas. Se destaca en negrita los valores más altos de prioridad por unidad.

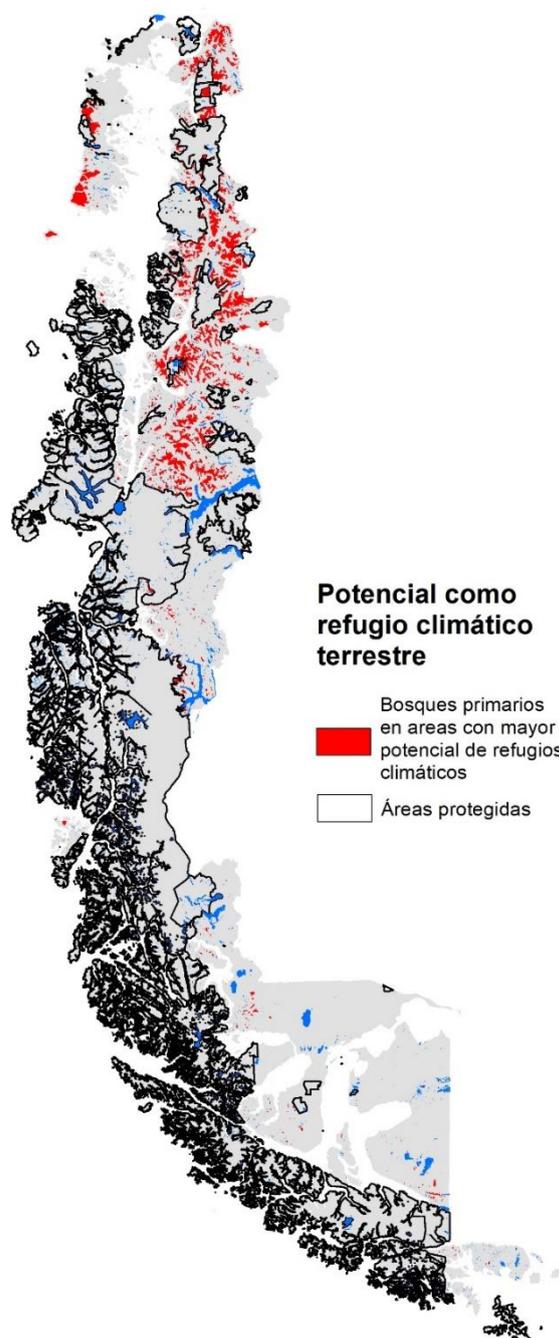
| Nombre área protegida | Superficie (hectáreas) máxima prioridad | Superficie (hectáreas) total | Porcentaje máxima prioridad |
|--|--|---|--|
| Parque Nacional Alberto de Agostini | 26.547 | 1.457.748 | 1,82 |
| Parque Nacional Alerce Andino | 1.495 | 39.438 | 3,79 |
| Parque Nacional Bernardo O'Higgins | 228.925 | 3.670.963 | 6,24 |
| Parque Nacional Cerro Castillo | 1.094 | 138.875 | 0,79 |
| Parque Nacional Chiloé | 11.202 | 41.892 | 26,74 |
| Parque Nacional Corcovado | 29.543 | 292.881 | 10,09 |
| Parque Nacional Hornopiren | 28.625 | 48.357 | 59,19 |
| Parque Nacional Isla Magdalena | 1.913 | 156.842 | 1,22 |
| Parque Nacional Kawesqar | 27.133 | 2.804.832 | 0,97 |
| Parque Nacional Laguna San Rafael | 141.141 | 1.709.211 | 8,26 |
| Parque Nacional Melimoyu | 3.459 | 82.949 | 4,17 |
| Parque Nacional Pali Aike | 222 | 5.155 | 4,30 |
| Parque Nacional Patagonia | 2.269 | 302.753 | 0,75 |
| Parque Nacional Pumalín Douglas Tompkins | 182.885 | 424.785 | 43,05 |
| Parque Nacional Queulat | 38.375 | 157.221 | 24,41 |
| Parque Nacional Torres del Paine | 7.518 | 228.449 | 3,29 |
| Parque Nacional Yendegaia | 2.222 | 153.659 | 1,45 |
| Reserva Nacional Futaleufú | 6.091 | 11.879 | 51,27 |
| Reserva Nacional Katalalixar | 34.570 | 727.340 | 4,75 |
| Reserva Nacional Lago Cochrane | 497 | 7.434 | 6,68 |
| Reserva Nacional Lago Jeinimeni | 711 | 159.927 | 0,44 |
| Reserva Nacional Lago Las Torres | 1.652 | 17.032 | 9,70 |
| Reserva Nacional Lago Palena | 21.508 | 38.761 | 55,49 |
| Reserva Nacional Lago Rosselot | 1.002 | 12.334 | 8,12 |
| Reserva Nacional Las Guaitecas | 25.293 | 1.079.223 | 2,34 |
| Reserva Nacional Llanquihue | 1.845 | 33.986 | 5,43 |
| Reserva Nacional Magallanes | 248 | 20.745 | 1,20 |
| Reserva Nacional Río Simpson | 663 | 42.085 | 1,57 |
| Monumento Natural Laguna de los Cisnes | 2.263 | 3.089 | 73,27 |
| Santuario de la Naturaleza Turberas de Púlpito | 79 | 244 | 32,56 |
| Santuario de la Naturaleza Alerzales existentes en el Fundo Potrero de Anay | 3.004 | 6.224 | 48,26 |
| Santuario de la Naturaleza Humedales de la Cuenca del Chepu | 239 | 2.903 | 8,22 |
| Santuario de la Naturaleza Humedales del Río Maullín | 2.422 | 8.122 | 29,82 |

Figura 7. Distribución de refugios climáticos terrestres (izquierda) y de los bosques primarios en áreas de alto potencial de refugio (derecha).



Al analizar zonas con potencial como refugios climáticos, pero fuera de la red de áreas silvestres protegidas (Figura 8), se observan algunas áreas relevantes en la región de Los Lagos (Chiloé continental) y en la región de Aysén. Se observa una mayor superficie con potencial de refugio climático en Dalcahue y Castro en Chiloé, Cochamó, Futaleufú y Palena en Chiloé continental, y las zonas de Cisnes, Aysén y Lago Verde en la región de Aysén, pero estas últimas con una superficie mucho menor que lo observado en la región de Los Lagos.

Figura 8. Distribución de áreas de alto potencial de refugio terrestres dentro de los bosques primarios, fuera de la red de áreas silvestres protegidas.



3.2 Refugios climáticos marinos

Los refugios climáticos marinos se distribuyen en cinco grandes zonas dentro del área marina de la Patagonia chilena (Figura 9). En la Región de Los Lagos, en el norte de la Isla Grande de Chiloé se identificó un refugio climático marino de poca superficie, siendo el único presente en esa región. En la Región de Aysén, en tanto, se identificó un segundo refugio climático marino en el archipiélago de las Guaitecas, que también correspondería al único de la región, mientras que en la Región de Magallanes se determinó la existencia de tres zonas con potencial de refugio climático marino: uno en los canales dentro del Parque Nacional Bernardo O'Higgins; otra en la zona interior de la Reserva Nacional Kawesqar y alrededor de la isla Riesco, y el último alrededor de la isla Navarino y del Parque Marino Diego Ramírez-Paso Drake. De estos, la Reserva Marina Pullinque es la que presenta mayor potencial

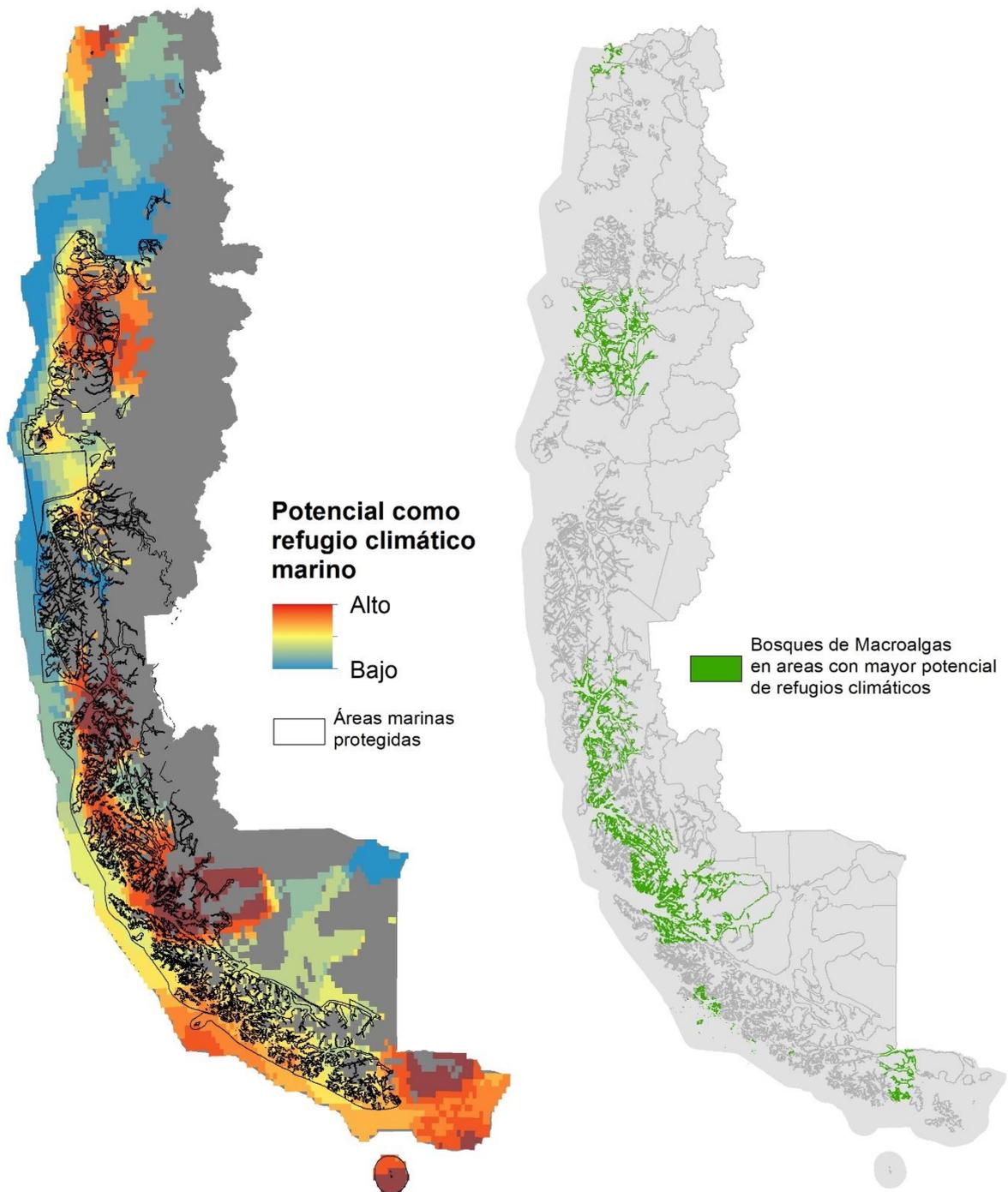
de refugio climático (Tabla 3). Mientras que las áreas con alto potencial de refugios climáticos, pero que no se superponen con áreas protegidas, son solamente las de la zona norte de Chiloé y la isla de Navarino, pero ambas zonas representan una superficie pequeña.

En cuanto a la superposición de los refugios climáticos marinos con los bosques de macroalgas, se puede observar que el 27,9 % de zonas con bosques de macroalgas coinciden con áreas priorizadas dentro del 30% de aquellas con mayor potencial de ser refugios climáticos marinos (Figura 8).

Tabla 3. Distribución en las áreas protegidas marinas de la Patagonia de las áreas identificadas con mayor potencial como refugio climático. Se destaca en negrita los valores más altos de superficie por unidad.

| Nombre área protegida | Superficie (hectáreas) máxima prioridad | Superficie (hectáreas) total | Porcentaje máxima prioridad |
|---|---|------------------------------|-----------------------------|
| Área Marina Costero Protegida Francisco Coloane | 4.433 | 60.628 | 7,3 |
| | 1.126 | | 1,9 |
| Parque Nacional Cabo de Hornos | 3.158 | 662.725 | 0,5 |
| | 68.152 | | 10,3 |
| Reserva Marina Pullinque | 67.184 | 756 | 10,1 |
| | 21 | | 2,7 |
| Parque Nacional Alberto de Agostini | 736 | 1.117.521 | 97,3 |
| | 126.077 | | 11,3 |
| Parque Nacional Bernardo O'Higgins | 7.011 | 790.476 | 0,6 |
| | 25.380 | | 3,2 |
| Parque Nacional Isla Magdalena | 25.614 | 44.398 | 3,2 |
| | 100.887 | | 12,8 |
| Reserva Nacional Kawesqar | 5.045 | 2.612.810 | 11,4 |
| | 353.737 | | 13,5 |
| Reserva Nacional Las Guaitecas | 382.289 | 825.572 | 14,6 |
| | 402.383 | | 15,4 |
| Reserva Nacional Las Guaitecas | 161.742 | 96.118 | 19,6 |
| | 163.072 | | 19,8 |
| | 96.118 | | 11,6 |

Figura 9. Distribución de refugios climáticos marinos (izquierda) y de bosques de macroalgas en áreas con alto potencial de refugio (derecha).



4. DISCUSIÓN

La metodología presentada y aplicada en este estudio permite identificar espacialmente la presencia de refugios climáticos, tanto en el ámbito terrestre como marino, en la Patagonia chilena.

Para la identificación de refugios climáticos del ámbito terrestre se propuso generar un índice combinado desde la integración de la geodiversidad, velocidad del cambio climático y la velocidad biótica, las cuales resultaron ser factores relevantes para la caracterización de la biodiversidad terrestre. Se optó por esta fórmula ya que, para Chile, los ejercicios previamente existentes de refugios climáticos solo tomaban en consideración la dimensión climática para su definición.

Distinto es el caso de los refugios climáticos marinos, donde se reconocen limitaciones en 1) la resolución espacial del análisis, ya que no existen superficies climáticas ni biofísicas disponibles a resoluciones espaciales más detalladas que 10 km, y 2) en las variables biofísicas utilizadas, a las que se podrían integrar otras que den cuenta de la diversidad biofísica existente en los océanos. Además, no se trabajó con variables asociadas a las amenazas socioambientales, dimensión que resulta clave para aplicar a la planificación de áreas protegidas ya que algunas de estas amenazas pueden coincidir con zonas identificadas como refugios climáticos y requerir un manejo particular en pos de su conservación.

Este trabajo incorpora la geodiversidad a través de la diversidad topográfica, y la biodiversidad a través de la velocidad biótica que comprende el cambio en el tiempo de los patrones de riqueza de especies de flora. Los resultados muestran que, a pesar de no existir una relación directa entre la geodiversidad y la presencia de bosques primarios, las zonas con mayor potencial de ser refugios climáticos sí se coinciden con la distribución de los bosques primarios. Esto se puede entender como la validación de los resultados y metodología propuesta, ya que los bosques primarios -por definición- se han desarrollado en zonas con heterogeneidad ambiental y diversidad de flora. Mientras que la velocidad biótica, al estar definida por la diferencia futura y presente de la riqueza de especies de flora, se puede relacionar indirectamente a los bosques primarios.

Además, la inclusión de la variable de diversidad climática entrega una dimensión distinta, incorporando espacialmente al cambio climático y demostrando que se puede integrar con los otros criterios utilizados para identificar refugios climáticos. Esto resulta relevante, ya que el uso de distintos criterios queda reflejado en distintas escalas espaciales y temporales de análisis (conceptos de micro y macro refugios), que pueden presentarse en forma integrada, como ocurre en este trabajo.

Respecto a la representación de los refugios climáticos en la red de áreas protegidas terrestres de la Patagonia chilena, se determinó que el Monumento Natural Laguna de Los Cisnes, en Aysén; el Parque Nacional Hornopirén, la Reserva Nacional Futaleufú y Reserva Nacional Lago Palena, en la Región de Los Lagos, coinciden con zonas de refugio. Sin embargo, es importante señalar que, en el sector norte de la Patagonia chilena, se identifican zonas con gran potencial como refugios climáticos que no se superponen con áreas protegidas. Esta situación que es mucho más evidente en la zona sur, en la Región de Magallanes, donde se identifican refugios climáticos en la isla de Tierra del Fuego y en la zona interior de estepa magallánica, que no están dentro de ninguna área con protección oficial.

En el caso de los refugios climáticos marinos, a pesar de las limitaciones antes señaladas, se pudieron identificar zonas que concentran alta productividad primaria y que se mantendrán más estables climáticamente en el futuro. Por lo tanto, son zonas que presentan un alto potencial como refugio climático, aunque con una baja superficie total. Estas corresponden, principalmente, a la Reserva Marina Pullinque, al norte de Chiloé, siendo esta la zona con mayor potencial, seguido por, PN Bernardo O´higgins, RN Kawesqar y RN Guaitecas, en la Región de Magallanes

Finalmente, la identificación de refugios climáticos tiene dos dimensiones importantes para la planificación de áreas protegidas de la Patagonia. Por un lado, proveen de un elemento concreto para incorporar en los planes de manejo que, en muchos casos, están aún en desarrollo en la Patagonia. Es en este ámbito donde los resultados aquí presentados se vuelven clave, ya que se identifican varios potenciales refugios dentro de las áreas protegidas. Por otro lado, y como inferencias a este estudio, las áreas identificadas como refugios climáticos ubicadas fuera de las áreas protegidas, deben analizarse como complementos a la red de protección existente, valorando su complementariedad y conectividad con el resto de la red de áreas protegidas.

Es de nuestro interés relevar la importancia de la identificación de refugios climáticos en el ámbito terrestre, dulceacuícola o marino, en tanto sirve de herramienta para priorizar los recursos dentro de la planificación de áreas protegidas. Esto es especialmente importante en el escenario actual de déficit en el financiamiento de las áreas protegidas, y de los consecuentes problemas de gestión asociado a ello.

5. CONCLUSION

- La aplicación de la metodología de identificación de refugios climáticos permitió relevar áreas con distintos potenciales como refugios climáticos, en el ámbito terrestre y marino de la Patagonia.
- La representatividad de los refugios climáticos en las áreas protegidas es mayor en la parte terrestre: el 80 % de las áreas protegidas estudiadas posee zonas con potencial de refugio climático.
- Los refugios climáticos en el ámbito terrestre se encuentran distribuidos a lo largo de la Patagonia, concentrándose en el sector norte (Chiloé insular y continental), zona interior de la Región de Aysén y zona norte de la isla Tierra del Fuego en la Región de Magallanes.
- Los refugios climáticos marinos se concentran en cuatro zonas: la Reserva Marina Pullinque, al norte de Chiloé, siendo esta la zona con mayor potencial, seguido por PN Bernardo O´higgins, RN Kawesqar y RN Guaitecas, en la Región de Magallanes.
- Es importante señalar refugios climáticos terrestres y marinos que también presentan un alto potencial de refugio climático, aunque con bajo porcentaje de máxima prioridad, como son PN Bernardo O´higgins, PN Laguna San Rafael, PN Pumalin, RN Katalalixar, RN Guaitecas en el ámbito terrestre; y PN Cabo de Hornos y PN Alberto de Agostini en el ámbito marino.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Ackerly, D. D., Loarie, S. R., Cornwell, W. K., Weiss, S. B., Hamilton, H., Branciforte, R., & Kraft, N. J. B. (2010). The geography of climate change: implications for conservation biogeography. *Diversity and distributions*, 16(3), 476-487.
- Ashcroft, M. B. (2010). Identifying refugia from climate change. *Journal of Biogeography*, 37(8), 1407–1413.
- Assis, J., Tyberghein, L., Bosch, S., Verbruggen, H., Serrão, E. A., & De Clerck, O. (2018). Bio-ORACLE v2.0: Extending marine data layers for bioclimatic modelling. *Global Ecology and Biogeography*, 27(3), 277–284.
- Astorga, A., Moreno-Meynard, P., Rojas, P., & Reid, B. (2021). Donde nacen los Ríos: Cuencas de Bosques Prístinos en la Patagonia Occidental Austral. *Conservación En La Patagonia Chilena: Evaluación Del Conocimiento, Oportunidades y Desafíos*, 167–198.
- Barrows, C. W., Ramirez, A. R., Sweet, L. C., Morelli, T. L., Millar, C. I., Frakes, N., ... Mahalovich, M. F. (2020). Validating climate-change refugia: empirical bottom-up approaches to support management actions. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 18(5), 298–306.
- Brooks, T. M., Mittermeier, R. A., da Fonseca, G. A. B., Gerlach, J., Hoffmann, M., Lamoreux, J. F., Mittermeier, C. G., Pilgrim, J. D., & Rodrigues, A. S. L. (2006). Global biodiversity conservation priorities. *Science*, 313(5783), 58–61.
- Carroll, C., Lawler, J. J., Roberts, D. R., & Hamann, A. (2015). Biotic and Climatic Velocity Identify Contrasting Areas of Vulnerability to Climate Change. *PLOS ONE*, 10(10), e0140486.
- Carroll, C., Roberts, D. R., Michalak, J. L., Lawler, J. J., Nielsen, S. E., Stralberg, D., ... Wang, T. (2017). Scale-dependent complementarity of climatic velocity and environmental diversity for identifying priority areas for conservation under climate change. *Global Change Biology*, 23(11), 4508–4520.
- Castilla, J. C., Armesto, J. J., y Martínez-Harms, M. J. (Eds.). (2021). *Conservación en la Patagonia chilena: evaluación del conocimiento, oportunidades y desafíos*. Santiago, Chile: Ediciones Universidad Católica, 600 p.
- Dai, Y., Hacker, C. E., Zhang, Y., Li, W., Zhang, Y., Liu, H., ... Li, D. (2019). Identifying climate refugia and its potential impact on Tibetan brown bear (*Ursus arctos pruinosus*) in Sanjiangyuan National Park, China. *Ecology and Evolution*, 9(23), 13278–13293.
- ESRI. (2021). ArcGIS PRO and Spatial Analyst Extension: Release 2.8. Environmental Systems Research Institute, Redlands.
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., ... Alsdorf, D. (2007). The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*, 45, RG2004.
- Fick, S. E., and R.J. Hijmans (2017). WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 37 (12): 4302-4315.
- Fuentes-Castillo, T., Scherson, R. A., Marquet, P. A., Fajardo, J., Corcoran, D., Román, M. J., & Pliscoff, P. (2019). Modelling the current and future biodiversity distribution in the Chilean Mediterranean hotspot. The role of protected areas network in a warmer future. *Diversity and Distributions*, 25(12), 1897–1909.
- García Molinos, J., Schoeman, D. S., Brown, C. J. & Burrows, M. T. (2019). VoCC: an R package for calculating the velocity of climate change and related climatic metrics. *Methods Ecol. Evol.* 10, 2195–2202.
- Halofsky, Jessica E.; Peterson, David L.; Gravenmier, Rebecca A., eds. (2022). *Climate change vulnerability and adaptation in southwest Oregon*. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-995. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 445 p.
- Keppel, G., Van Niel, K. P., Wardell-Johnson, G. W., Yates, C. J., Byrne, M., Mucina, L., ... Franklin, S. E. (2012). Refugia: identifying and understanding safe havens for biodiversity under climate change. *Global Ecology and Biogeography*, 21(4), 393–404.
- Kyprioti, A., Alpanidou, V., Chatzimentor, A., Katsanevakis, S., & Mazaris, A. D. (2021). Is the current Mediterranean network of marine protected areas resilient to climate change? *Science of The Total Environment*, 792, 148397.

- Loarie, S. R., Duffy, P. B., Hamilton, H., Asner, G. P., Field, C. B., & Ackerly, D. (2009). The velocity of climate change. *Nature*, 462(7276), 1052–1055.
- Mathiasen, P., Venegas-González, A., Fresia, P., & Premoli, A. C. (2020). A relic of the past: current genetic patterns of the palaeoendemic tree *Nothofagus macrocarpa* were shaped by climatic oscillations in central Chile. *Annals of botany*, 126(5), 891–904.
- McCune, B., & Keon, D. (2002). Equations for potential annual direct incident radiation and heat load. *Journal of Vegetation Science*, 13, 603–606.
- McWhorter, J. K., Halloran, P. R., Roff, G., Skirving, W. J., & Mumby, P. J. (2022). Climate refugia on the Great Barrier Reef fail when global warming exceeds 3°C. *Global Change Biology*.
- Michalak, J. L., Withey, J. C., Lawler, J. J., & Case, M. J. (2017). Future climate vulnerability - evaluating multiple lines of evidence. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 15(7), 367–376.
- Michalak, J. L., Lawler, J. J., Roberts, D. R., & Carroll, C. (2018). Distribution and protection of climatic refugia in North America. *Conservation Biology*, 32(6), 1414–1425.
- Michalak, J. L., Stralberg, D., Cartwright, J. M., & Lawler, J. J. (2020). Combining physical and species-based approaches improves refugia identification. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 18(5), 254–260.
- Moilanen, A., Lehtinen, P., Kohonen, I., Jalkanen, J., Virtanen, E. A., & Kujala, H. (2022). Novel methods for spatial prioritization with applications in conservation, land use planning and ecological impact avoidance. *Methods in Ecology and Evolution*, 2022(July 2021), 1–11.
- Mora-Soto, A., Palacios, M., Macaya, E. C., Gómez, I., Huovinen, P., Pérez-Matus, A., ... Macias-Fauria, M. (2020). A high-resolution global map of giant kelp (*Macrocystis pyrifera*) forests and intertidal green algae (Ulvophyceae) with sentinel-2 imagery. *Remote Sensing*, 12(4), 1–20.
- Morelli, T. L., Daly, C., Dobrowski, S. Z., Dulen, D. M., Ebersole, J. L., Jackson, S. T., ... Beissinger, S. R. (2016). Managing Climate Change Refugia for Climate Adaptation. *Plos One*, 11(8), e0159909.
- Morelli, T. L., Barrows, C. W., Ramirez, A. R., Cartwright, J. M., Ackerly, D., Eaves, T. D., ... Thorne, J. H. (2020). Climate-change refugia: biodiversity in the slow lane. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 18(5), 228–234.
- Parks, S. A., Carroll, C., Dobrowski, S. Z., & Allred, B. W. (2020). Human land uses reduce climate connectivity across North America. *Global Change Biology*, 26(5), 2944–2955.
- Pecl, G. T., Araújo, M. B., Bell, J. D., Blanchard, J., Bonebrake, T. C., Chen, I.-C., et al. (2017). Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being. *Science* 355:eaai9214
- Pliscoff, P., Luebert, F., Hilger, H. H., & Guisan, A. (2014). Effects of alternative sets of climatic predictors on species distribution models and associated estimates of extinction risk: A test with plants in an arid environment. *Ecological Modelling*, 288, 166–177.
- Programa Austral Patagonia (2020). “Patagonia Refugio Climático: Propuesta de soluciones basadas en la naturaleza para las contribuciones nacionales ante la CMNUCC”. Serie de Documentos de Trabajo Universidad Austral de Chile - Valdivia, Chile.
- Ramirez, A.R., Krawchuk, M., Ebersole, J., Morelli, T.L., Bisbal, G., Cartwright, J.M. and M. J. Ratnasway. 2017. Refugia Research Coalition: A regional-scale approach for connecting refugia science to natural and cultural resources management. Ecological Society of America Annual Meeting. Portland, Oregon.
- Reside, AE, VanDerWal, J, Phillips, B, Shoo, LP, Rosauer, DF, Anderson, BJ, Welbergen, J, Moritz, C, Ferrier, S, Harwood, TD, Williams, KJ, Mackey, B, Hugh, S, Williams, SE (2013) Climate change refugia for terrestrial biodiversity: Defining areas that promote species persistence and ecosystem resilience in the face of global climate change, National Climate Change Adaptation Research Facility, Gold Coast.
- Rocchini, D., Thouverai, E., Marcantonio, M., Iannacito, M., Da Re, D., Torresani, M., ... Wegmann, M. (2021). rasterdiv—An Information Theory tailored R package for measuring ecosystem heterogeneity from space: To the origin and back. *Methods in Ecology and Evolution*, 12(6), 1093–1102.

- Sayre, R., Dangermond, J., Frye, C., Vaughan, R., Aniello, P., Breyer, S. Comer, P. (2014). A new map of global ecological land units—An eco- physiographic stratification approach. Washington, DC: Association of American Geographers.
- Selwood, K. E., & Zimmer, H. C. (2020). Refuges for biodiversity conservation: A review of the evidence. *Biological Conservation*, 245, 108502.
- Spalding, M. D., Fox, H. E., Allen, G. R., Davidson, N., Ferdana, Z. A., Finlayson, M. A. X., & Robertson, J. (2007). Marine ecoregions of the world: a bioregionalization of coastal and shelf areas. *BioScience*, 57(7), 573-583.
- Stralberg D, Carroll C, Pedlar JH, et al. (2018). Macrorefugia for North American trees and songbirds: climatic limiting factors and multi- scale topographic influences. *Global Ecology & Biogeography* 27: 690–703.
- Stralberg, D., Arseneault, D., Baltzer, J. L., Barber, Q. E., Bayne, E. M., Boulanger, Y., ... Whitman, E. (2020a). Climate-change refugia in boreal North America: what, where, and for how long? *Frontiers in Ecology and the Environment*, 18(5), 261–270.
- Stralberg, D., Carroll, C., & Nielsen, S. E. (2020b). Toward a climate-informed North American protected areas network: Incorporating climate-change refugia and corridors in conservation planning. *Conservation Letters*, e12712.
- Thorne, J. H., Gogol-Prokurat, M., Hill, S., Walsh, D., Boynton, R. M., & Choe, H. (2020). Vegetation refugia can inform climate-adaptive land management under global warming. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 18(5), 281–287.
- Valencia, J., Hucke, R., & Tecklin, D. (2020). Patagonia Refugio Climático: Propuesta de soluciones basadas en la naturaleza para las contribuciones nacionales ante la CMNUCC. Serie de Documentos de Trabajo del Programa Austral Patagonia, Universidad Austral de Chile - Valdivia, 45 páginas.
- Villagrán, C. (1991). Historia de los bosques templados del sur de Chile durante el Tardiglacial y Postglacial. *Revista Chilena de Historia Natural*, 64(3), 447-460.



Programa
Austral
Patagonia
Universidad Austral de Chile