



*No pidas garantías, no pidas seguridad.
Nunca ha existido algo así. Y, si existiera,
estaría emparentado con el gran perezoso
que cuelga boca abajo de un árbol, y
todos y cada uno de los días, empleando
la vida en dormir.*

R. Bradbury

Agradecimientos

La realización de esta Tesis Doctoral fue posible gracias a la colaboración y el apoyo de numerosas personas, no sólo durante todo este proceso sino incluso antes de comenzarlo. A todos ellas, mi infinito agradecimiento.

Agradezco a mis directores Dr. Marcelo Arturi, Dra. Andrea Drozd, y PhD Sebastián Martinuzzi, por su instrucción durante esta etapa de formación. Quiero agradecer muy especialmente a Marcelo por su constante acompañamiento, paciencia, dedicación y compromiso con este trabajo, pero sobre todo por la confianza que depositó en mí aún sin conocerme. La entrega de este trabajo de tesis en tiempo y forma fue posible gracias a su esfuerzo, apoyo y a sus continuas palabras de aliento.

Agradezco especialmente al Dr. Jorge Frangi, por su constante apoyo, intercambio de ideas y por sus consejos. Por ser el ideólogo de este proyecto y a través de él acercarme a la posibilidad de realizar el doctorado.

Agradezco a mis padres, Gloria y Pedro, por su inagotable esfuerzo al querer brindarnos siempre un futuro mejor. A mi padre especialmente, por transmitirme su amor y admiración por la naturaleza. A mi tía Josefa y a mi hermano Carlos que hicieron de puente entre la Universidad y yo.

A mi compañero de vida, Rodrigo Gabiassi, que no sólo acompañó este proceso sino que apoyó activa e incansablemente cada decisión y cada día transcurrido independientemente del color, entre azul y gris, y de sus muchos matices.

A mis compañeras y compañeros del LISEA -Magalí Perez Flores, Micaela Medina, Maia Plaza Behr, Carolina Perez, Martín Sandoval, Sarah Burns, Marcelo Arturi, Juan Goya, Marcelo Barrera, Mariana Dabadie, Pablo Yapura, y los recientemente incorporados Julián Mijailoff y Carolina Serra-, les agradezco los aportes académicos, los consejos y sugerencias. A todos ellos quiero agradecer enormemente los distintos momentos compartidos -intercambios, charlas, salidas- que en estos cinco años me han enriquecido enormemente como persona.

Quiero agradecer por sus aportes a mis amigas y amigos. A Gabriela Yañez por las inagotables charlas, consejos, intercambios académicos y por su enorme apoyo en los momentos más difíciles. A Rosario Zingoni, Julia D'Angelo y Virginia Zaplara, a

quienes admiro profundamente, por acompañarme en este recorrido. A Ivanna Tropper, Aldana Bini y Francisco Nemiña por apoyar y acompañar mi decisión de comenzar este proyecto, aunque eso implicara alejarnos un poco, al menos en lo cotidiano. A Natalia Morales y Luis Couyoupetrou por el apoyo constante, las charlas e intercambios académicos, me alegra mucho habernos encontrado en este último tramo y tenernos para lo que vendrá. Quiero agradecer a Federico Agnolín, Sergio Lucero, Nicolas Chimento y Elián Guerrero de quienes aprendí muchísimo y han alentado mi amor por la biología. Mi admiración y agradecimiento para ellos.

Mis compañeras de cátedra, Anabel Lamaro, Betina Zucchini y Sandra Torrusio han colaborado en incontables ocasiones con consejos y sugerencias. Agradezco su apoyo, pero sobre todo su gran compañerismo, trabajar a su lado es aprendizaje constante.

A los estudiantes que he conocido durante el desempeño docente, porque de ustedes se aprende y se recibe una inmensa energía que me motiva a intentar ser siempre mejor que ayer. En especial a Lucrecia Toledo por su invaluable aporte a este trabajo.

Agradezco enormemente a los colegas que han realizado valiosos aportes para el desarrollo de este trabajo de tesis: Néstor Barrionuevo (INTA), Alberto Bianchi y Silvia Cravero (INTA), Maru Skansi (SMN), Inés Camilloni (CIMA-CONICET), Ariel Lugo (IITF).

Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas por financiar este trabajo.

A la Universidad Nacional de Avellaneda por financiar este trabajo, pero sobre todo por el aprendizaje, porque trabajando allí entendí muy bien que no sobran Universidades sino que faltan oportunidades. Un orgullo haber sido parte de su plantel docente.

A la Universidad Nacional de La Plata, mi casa de estudios, pública y gratuita, siempre.

Contenidos

Resumen.....	i
Abstract	v
CAPITULO 1.INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.1 Antecedentes y fundamentación	1
1.1.1 Zonificación ecológica del territorio.....	1
1.1.2 El modelo de Holdridge como sistema de zonificación ecológica	5
1.2 Objetivo	8
1.3 Estructura de la tesis	8
CAPITULO 2. ZONAS DE VIDA DE ARGENTINA.....	10
2.1 Introducción	10
2.2 Materiales y métodos	14
2.2.1 Área de estudio	14
2.2.2 Fuentes de datos climáticos.....	22
2.2.3 Variables que definen las zonas de vida, regiones latitudinales y fajas altitudinales	23
2.2.4 Determinación de las zonas de vida.....	25
2.3 Resultados	28
2.3.1 Verificación de la calidad de los datos climáticos	28
2.3.2 Variables bioclimáticas.....	30
2.3.3 Línea de heladas (o línea crítica)	31
2.3.4 Regiones latitudinales, fajas altitudinales y provincias de humedad.....	32
2.3.5 Zonas de vida.....	38
2.4 Discusión	44
2.4.1 Las Regiones Latitudinales de Argentina.....	44
2.4.2 Las zonas de vida en la Argentina	49
CAPITULO 3. EFECTO DE LA INCERTIDUMBRE DE LOS MODELOS CLIMÁTICOS SOBRE LA CLASIFICACIÓN ECOLÓGICA DE LA TIERRA.....	51
3.1 Introducción	51
3.2 Materiales y métodos	54
3.2.1 Zonas de vida de Holdridge	54
3.2.2 Datos climáticos	54
3.2.3 Análisis de los datos	55
3.3 Resultados	60
3.3.1. Incertidumbre asociada a los datos grillados locales.....	60

3.3.2. Acuerdo MCL-MCG comparado con la incertidumbre del MCL.....	60
3.3.3. Efecto de la resolución espacial y ambiental sobre el acuerdo MCL-MCG.....	61
3.3.4. Acuerdo MCL-MCG y heterogeneidad climática y topográfica.....	63
3.4. Discusión	64
CAPITULO 4. APLICACIONES DEL SISTEMA DE ZONAS DE VIDA DE HOLDRIDGE.....	67
4.1 Introducción	67
4.2 Materiales y métodos	72
4.2.1 Fuentes de datos climáticos para el modelado.....	72
4.2.2 Caracterización bioclimática de ecorregiones y usos de la tierra	74
4.2.3 Categorización bioclimática y su potencial para el uso de la tierra	81
4.3 Resultados	83
4.3.1 Zonas de vida y cambio climático.....	83
4.3.2 Zonas de vida y zonas ecológicas	104
4.3.3 Zonas de vida y uso de la tierra.....	123
4.4 Discusión	102
CAPITULO 5. DISCUSIÓN FINAL	143
BIBLIOGRAFIA.....	149

Resumen

Una zonificación ecológica, que define y clasifica unidades ecológicamente homogéneas, es fundamental para diseñar el manejo de ecosistemas. La zonificación ecológica de un país es una herramienta que permite reconocer la heterogeneidad ambiental, establecer sus relaciones con variables bióticas y productivas, y evaluar los cambios en el uso del suelo y su relación con estrategias de conservación. La delimitación y clasificación del territorio en unidades ecológicas homogéneas contribuye al desarrollo de un manejo ecosistémico más preciso e integrado. El sistema de zonificación ecológica de Holdridge define las condiciones del funcionamiento de los ecosistemas a través de su principal unidad ecológica: la zona de vida, alejándose de la existencia de un esquema estable de unidades de vegetación. Una zona de vida es un conjunto natural de asociaciones que utiliza tres variables - biotemperatura media anual, precipitación total anual acumulada y cociente de evapotranspiración potencial- limitantes para el desarrollo de procesos biológicos, y expresadas en rangos de escala logarítmica. A su vez, el sistema considera la posición de las zonas de vida en regiones latitudinales, en función de la distribución del calor a nivel del mar (biotemperatura basal) y en fajas altitudinales, en función de la distribución de calor a nivel de superficie (biotemperatura). Las unidades bioclimáticas que define pueden relacionarse de manera simple con la vegetación y pueden proporcionar proyecciones sobre futuros patrones de distribución. Dada su relativa simplicidad, se propone como un buen método para abordar estudios de impacto climático en circunstancias de disponibilidad limitada de conjuntos de datos regionales. Si bien los nombres de las zonas de vida refieren a tipos fisonómicos de vegetación, éstas pueden no corresponderse con la cobertura vegetal real del terreno, debido a que la zona de vida constituye sólo la primera categoría jerárquica de las divisiones ambientales del modelo, y no incluye otros factores que afectan el tipo de vegetación. Las variables utilizadas en el sistema de zonas de vida pueden derivar de modelos climáticos locales (MCL) o modelos climáticos globales (MCG). Al aplicar MCL, es importante evaluar cómo las incertidumbres de estos datos afectan la clasificación ecológica. Por otra parte, si se aplican MCG, es importante evaluar las diferencias entre la clasificación ecológica derivada de los MCG y aquella derivada de los MCL, incluyendo tanto la magnitud como la variación espacial de esas diferencias, ya que los

datos climáticos disponibles para modelar escenarios futuros son generalmente globales. Al mismo tiempo, la comparación entre mapas puede verse afectada por la resolución espacial y por cambios en la resolución temática (ambiental). Modelar las variaciones en la distribución de las zonas de vida debidas a la variación del clima, a través de las proyecciones de cambio climático, hace de este sistema una zonificación dinámica. Vincular el sistema de zonas de vida con unidades ecológicas como las definidas por las ecorregiones, permite monitorear las posibles transformaciones vinculadas al cambio climático en estas unidades. Asimismo, analizar las tendencias futuras de cambio y sus posibles implicancias sobre las áreas prioritarias para conservación y sobre los distintos usos de la tierra bajo el sistema de zonas de vida, permitiría aportar sugerencias para mejorar la planificación y el manejo del territorio. Los datos climáticos utilizados en este trabajo para establecer las zonas de vida se obtuvieron a partir del Atlas Climático Digital de la República Argentina, del INTA, que provee datos grillados con una resolución espacial de 1 km. La validación de esta información se estableció a través de una correlación de Pearson con observaciones de 80 estaciones meteorológicas, distribuidas a lo largo del país, provenientes del SMN. Las variables bioclimáticas estimadas fueron categorizadas en los distintos rangos logarítmicos propuestos por la clasificación de Holdridge y se combinaron para definir las zonas de vida y luego asignarlas a una región latitudinal y faja altitudinal. Para establecer la incertidumbre del modelo climático local (MCL) se modificó cada valor de temperatura y precipitación de la grilla por un nuevo valor establecido aleatoriamente, lo que resultó en un modelo climático local "alterado" (MCLa). Luego se midió el porcentaje de acuerdo entre modelos y se establecieron los límites de confianza del 90% para este porcentaje. Para medir el acuerdo entre los MCL y los MCG se utilizó la base de datos WorldClim, que proporciona información climática a escala global con una resolución espacial de 1 km. El mapa de zonas de vida derivado del MCL se comparó con un nuevo mapa de zonas de vida obtenido a partir del MCG. Luego, se evaluó si el porcentaje de acuerdo entre modelos estaba contenido dentro de los intervalos de confianza estimados para el porcentaje de acuerdo entre el MCL y el MCLa. Para evaluar el efecto de la resolución espacial y ambiental en el acuerdo entre el modelo local y el modelo global, se aplicó un análisis de resolución múltiple. Para vincular las zonas de vida, actuales y proyectadas a futuro, con las principales unidades

fisionómicas de la vegetación de Argentina, se comparó espacialmente el mapa de zonas de vida con el de ecorregiones, tipos de uso de la tierra y áreas protegidas. Se establecieron índices bioclimáticos, el "índice de correspondencia bioclimática" (ICB) y el "índice de diversidad bioclimática" (IDB). El ICB identificó las ecorregiones o usos de la tierra que tienen zonas de vida que les son propias y por tanto no comparten características bioclimáticas con otras regiones; mientras que el IDB identificó las unidades de ecorregiones o usos con mayor diversidad bioclimática. Mediante un análisis multivariado se evaluaron las relaciones de distancia bioclimática entre ecorregiones, y entre usos de la tierra, en el escenario climático actual y los proyectados a futuro. La distribución de las zonas de vida se analizó también en las Áreas Protegidas de Argentina para establecer el grado de representación de la diversidad bioclimática en el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP), y definir aquellas regiones que requieren mayor esfuerzo de conservación debido a los posibles impactos del cambio climático en la distribución de las zonas de vida. Finalmente, los usos de la tierra agrícola, silvícola y ganadero se analizaron en el esquema de potencial de uso de las zonas de vida. Se identificaron 83 zonas de vida en Argentina, que representan el 69 % del total de las 120 reconocidas en el diagrama de zonas de vida. El acuerdo medio entre el MCL y el MCLa a nivel de todo el país fue de aproximadamente 75%. El acuerdo medio entre los mapas de zonas de vida derivados del MCL y el MCG fue del 70% a nivel país, este valor varió sustancialmente entre las regiones latitudinales (40-83%). Por otra parte, aumentar el tamaño de píxel no mejoró el acuerdo MCL-MCG pero éste sí puede aumentar al reducir la resolución temática. Entre las ecorregiones de menor ICB se encontraron Campos y Malezales, Delta e islas del Río Paraná y Esteros del Iberá, mientras que Chaco Seco y Estepa Patagónica presentaron ICB mayores de 0,7 y reducidos intervalos de confianza en comparación con otras ecorregiones. Las ecorregiones con mayor diversidad de zonas de vida (IDB) y menor amplitud de los intervalos de confianza fueron aquellas con mayores variaciones altitudinales en el Noroeste y en la Patagonia. Los cambios más importantes en los ICB de las zonas de vida se observaron en las ecorregiones Selva Paranaense, Selva de Yungas, Chaco Seco, Chaco Húmedo, Monte de Sierras y Bolsones, Puna, Altos Andes y Estepa Patagónica. Los índices bioclimáticos resultantes del análisis de usos de la tierra y zonas de vida mostraron una correspondencia

climática menor que aquella obtenida para las ecorregiones y por tanto los cambios fueron difícilmente interpretables. Las zonas de vida representadas en el SNAP fueron 66 de las 83 que se registran para el país en el escenario actual. En base a la superficie total de Argentina, el porcentaje conservado en AP calculado fue de 7%. La actividad agrícola se registró en zonas de vida "Óptimas para la Producción", la ganadería extensiva se dio principalmente en zonas "Demasiado Secas", las plantaciones forestales se registraron principalmente en zonas de vida "Demasiado Húmedas". La distribución de las actividades productivas analizadas se ajustó al esquema de potencialidad de uso de las zonas de vida lo que permitiría monitorear las tendencias de cambio de uso y aportar a mejorar la planificación territorial. La comparación visual entre zonas de vida y ecorregiones indica una correspondencia en su distribución que resultó coherente con los ICB y refleja que las zonas bioclimáticamente homogéneas, son ecológicamente interpretables. Las proyecciones realizadas permiten identificar las principales tendencias de cambio en las ecorregiones y los principales vacíos de la red actual de Áreas Protegidas y destaca que la representación de zonas de vida en el SNAP resulta insuficiente frente a la diversidad bioclimática que presenta Argentina y la sensibilidad que muestran ciertos sectores. Este trabajo confirmó que Argentina presenta una gran diversidad de zonas de vida y por ende una gran heterogeneidad bioclimática. Los resultados destacan la necesidad de cuantificar la incertidumbre de los datos climáticos, especialmente en áreas climáticamente muy heterogéneas, y proporcionan formas de cuantificar y tratar esa incertidumbre.

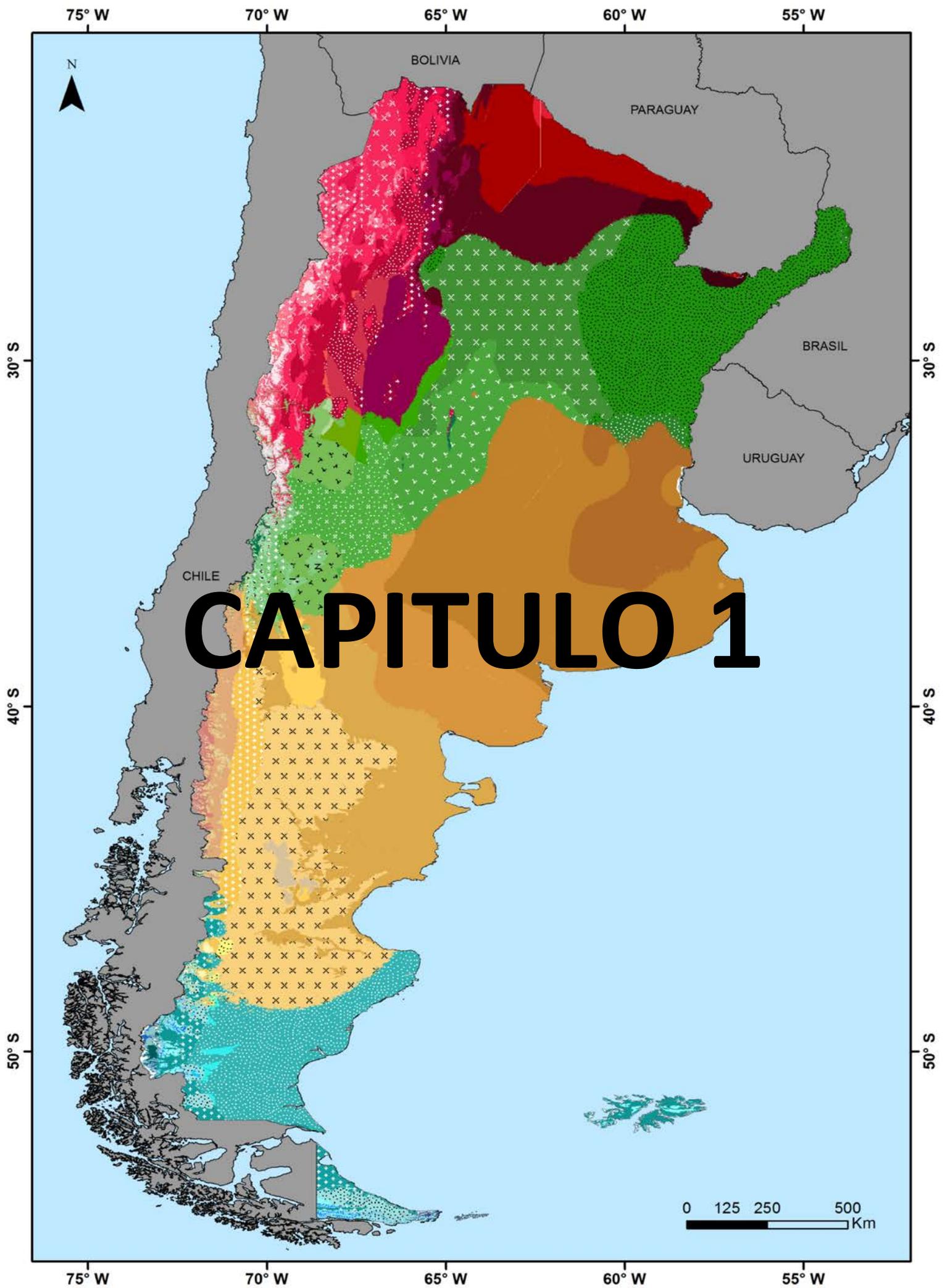
Abstract

An ecological zoning, which defines and classifies ecologically homogeneous units, is essential ecosystem management design. A country's ecological zoning is a tool that allows us to recognize environmental heterogeneity, establish its relations with biotic and productive variables, and evaluate changes in land use and its relationship with conservation strategies. The delimitation and classification of the territory into homogeneous ecological units contributes to the development of a more precise and integrated ecosystem management. Holdridge's ecological zoning system defines the operating conditions of ecosystems through its main ecological unit: the life zone, which moves away from the existence of a stable scheme of vegetation units. A life zone is a natural set of associations that uses three variables limiting for the development of biological processes—average annual temperature, total annual precipitation, and potential evapotranspiration ratio—, expressed in logarithmic scale ranges. At the same time, the system considers the position of life zones in latitudinal regions, depending on the distribution of heat at sea level (basal biotemperature) and on altitudinal belts, depending on the distribution of heat at the surface level (biotemperature). The bioclimatic units defined by the system can be simply related to vegetation and can provide projections on future distribution patterns. Given its relative simplicity, it is proposed as a good method to address climate impact studies in circumstances of limited availability of regional datasets. Although the names of the life zones refer to physiognomic types of vegetation, these may not correspond to the real land vegetation cover, because the life zone constitutes only the first hierarchical category of the environmental divisions of the model, and it does not include other factors affecting the type of vegetation. The variables used in the life zone system may derive from local climate models (LCM) or global climate models (GCM). When applying LCM, it is important to evaluate how the uncertainties of these data affect the ecological classification. On the other hand, if GCM are applied, it is important to evaluate the differences between the ecological classification derived from the GCM and that derived from the LCM, including both the magnitude and the spatial variation of these differences, since the climatic data available to model future scenarios are generally global. At the same time, the comparison between maps can be affected by

spatial resolution and by changes in the thematic (environmental) resolution. Modeling the variations in the distribution of life zones due to climate variation through the projections of climate change makes this a dynamic zoning system. By linking the system of life zones with ecological units such as those defined by the ecoregions, it is possible to monitor the possible transformations linked to climate change in these units. Likewise, analyzing the future trends of change and their possible implications for the priority areas for conservation and the different land uses under the system of life zones would make it possible to offer suggestions to improve territory planning and management. The climatic data used in this work to establish the life zones were obtained from the INTA Digital Climate Atlas of Argentina, which provides data with a spatial resolution of 1 km. The validation of this information was established through a Pearson correlation with observations from 80 SMN weather stations, distributed throughout the country. The estimated bioclimatic variables were categorized in the different logarithmic ranges proposed by the Holdridge classification and were combined to define the life zones and then were then assigned to a latitudinal region and altitudinal belt. To establish the uncertainty of the local climate model (LCM), each value -temperature and precipitation- in the gridded data was modified by a random value that resulted in an "altered" local climate model (aLCM). Then the percentage of agreement between models was measured and the 90% confidence limits for this percentage were established. The WorldClim database was used to measure the agreement between the LCM and the GCM, which provides global climate information with a spatial resolution of 1 km. The map of life zones derived from the LCM was compared with a new map of life zones obtained from the GCM. Then, it was evaluated whether the percentage of agreement between models was contained within the confidence intervals estimated for the percentage of agreement between the LCM and the aLCM. To assess the effect of spatial and environmental resolution on the agreement between the local model and the global model, a multiple resolution analysis was applied. To link the life zones, current and projected for the future, with the main physiognomic units of the vegetation of Argentina, the map of life zones was compared spatially with that of ecoregions, types of land use, and protected areas. The "bioclimatic correspondence index" (BCI) and the "bioclimatic

diversity index" (BDI) were established. The BCI identifies the ecoregions or land uses that have their own life zones and, therefore, do not share bioclimatic characteristics with other regions, while the BDI identifies the units of ecoregions or uses with greater bioclimatic diversity. Through a multivariate analysis, the relationships of bioclimatic distance between ecoregions and between land uses in the current climate scenario and those projected for the future were evaluated. The distribution of life zones was also analyzed in the Protected Areas (PA) of Argentina to establish the degree of representation of bioclimatic diversity in the Protected Areas National System (PANS), and to define those regions that require the greatest conservation efforts due to the possible impacts of climate change on the distribution of life zones too. Finally, the uses of agricultural, forestry, and livestock production were analyzed in the scheme of potential use of life zones. In Argentina, 83 life zones were identified, representing 69% of the total of the 120 recognized in the original diagram of life zones. The average agreement between the LCM and the aLCM at country level was approximately 75%. The average agreement between the life zone maps derived from the LCM and the GCM was 70% at the country level, but this value varied substantially between the latitudinal regions (40-83%). On the other hand, increasing the pixel size did not improve the LCM-GCM agreement, but it can be increased by reducing the thematic resolution. Among the ecoregions of lower BCI were Campos y Malezales, Delta e islas del Río Paraná, and Esteros del Iberá, while Chaco Seco and Estepa Patagónica presented BCI greater than 0.7 and reduced confidence intervals compared to other ecoregions. The ecoregions with the greatest diversity of life zones (BDI) and the smallest range of confidence intervals were those with the highest altitude variations in the Northwest and Patagonia. The most important changes in the BCI of the life zones were observed in the ecoregions Selva Paranaense, Selva de Yungas, Chaco Seco, Chaco Húmedo, Monte de Sierras y Bolsones, Puna, Altos Andes, and Estepa Patagónica. The bioclimatic indices resulting from the analysis of land uses and life zones showed a lower climatic correspondence than that obtained for the ecoregions; therefore, the changes were hardly interpretable. The life zones represented in the PANS were 66 of the 83 that are registered for the country in the current scenario. Based on the total area of Argentina, the percentage conserved in PA

calculated was 7%. The agricultural activity was registered in "Optimal for Production" life zones; extensive livestock production was mainly in "Too Dry" areas; and forest plantations were mainly recorded in "Too Wet" life zones. The distribution of the analyzed productive activities was adjusted to the scheme of potentiality of use of the life zones, which would make it possible to monitor the trends in land use changes and contribute to a better territorial planning. The visual comparison between the map of life zones and that of the ecoregions indicates a correspondence in their distribution that was consistent with the BCI and reflects that the bioclimatically homogeneous zones, defined by the Holdridge system, are ecologically interpretable. The projections made enable us to identify the main trends of change in the ecoregions and the main gaps in the current network of Protected Areas, and stress that the representation of life zones in the PANS is insufficient compared to the bioclimatic diversity in Argentina and the sensitivity that certain sectors show. This work confirms that Argentina has an enormous diversity of life zones and therefore a significant bioclimatic heterogeneity. The results obtained highlight the need to quantify the uncertainties of the climatic data, especially in highly heterogeneous climatic areas, and provide ways to quantify and address these uncertainties.



CAPITULO 1.INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 Antecedentes y fundamentación

1.1.1 Zonificación ecológica del territorio

La zonificación es un proceso de sectorización de un territorio en unidades espaciales relativamente homogéneas según un criterio específico. Estos criterios pueden variar, de acuerdo a los propósitos de aplicación, y en general están relacionados a factores biofísicos, sociales, económicos, culturales, políticos o administrativos. La zonificación resulta entonces un instrumento de planificación que facilita la identificación de áreas geográficas con una combinación de características que pueden ser interpretadas en términos de objetivos para la gestión. Es así que, a partir de zonificaciones de diversos enfoques surgen estudios sobre conservación de la biodiversidad (*e.g.* Bridgewater y Cresswell 1999, Channell y Lomolino 2000, Spector 2002, Giraud y Arzamendia 2018), impactos del cambio climático (*e.g.* Yates *et al.* 2000, Yue *et al.* 2001, Smith y Lazo 2001) o vinculados a la dinámica de uso de la tierra (*e.g.* Ellis y Ramankutty 2008)

En particular, una zonificación ecológica, que define y clasifica unidades ecológicamente homogéneas, es fundamental para diseñar el manejo de ecosistemas (Lugo *et al.* 1999). La zonificación ecológica de un país es una herramienta que permite reconocer la heterogeneidad ambiental, establecer sus relaciones con variables bióticas y productivas, y evaluar los cambios en el uso del suelo y su relación con estrategias de conservación. La delimitación y clasificación del territorio en unidades ecológicas homogéneas contribuye al desarrollo de un manejo ecosistémico más preciso e integrado. Para esto, un sistema de clasificación ecológica debería basarse en variables cuantitativas y ser sensible a los cambios que ocurren en los factores ambientales que afectan el desarrollo o la distribución espacial de los ecosistemas. A su vez, debería reconocer los cambios introducidos por las actividades humanas y corresponder a unidades naturales que puedan diferenciarse en unidades en el campo. Finalmente, para que un sistema ecológico tenga aplicación mundial, debe estar definido por factores con aplicación en este mismo nivel (Céspedes y Tosi 2000).

Uno de los sistemas de clasificación ecológica más utilizados es la clasificación por biomas. Los biomas son zonas geográficas definidas por un determinado clima al cual las plantas responden con adaptaciones fisiológicas similares (*e.g.* Clements y Shefold 1939). El abordaje de la clasificación por biomas ha tenido dos grandes enfoques: aquellos provenientes de la **biogeografía** (Bailey 1983) que describen rangos climáticos a partir de clasificaciones latitudinales y por tipos de vegetación homogénea; y aquellos provenientes de la **ecología** (*e.g.* Holdridge 1947, 1967; Prentice *et al.* 1992) los cuales predicen unidades potenciales ecológicamente funcionales -zonas de vida- a partir de modelos empíricos que relacionan variables físicas como lo son las variables climáticas.

En Argentina, el enfoque predominante para la clasificación de los biomas fue el biogeográfico (Lorenz 1876, Holmberg 1898, Rovereto 1914, Hauman 1920, 1931, Kühn 1930, Parodi 1934, 1945, 1964, Frenguelli 1941, Castellanos y Pérez Moreau 1941, 1944, Cabrera 1953, 1971, 1976). Entre estos trabajos, el de Lorentz (1876) fue la primera zonificación biogeográfica para la Argentina, en su propuesta dividió el territorio en nueve unidades fitogeográficas de carácter fisonómico, a las que denominó "Formaciones". En las zonificaciones que siguieron a este trabajo, el criterio predominante para establecer la delimitación de las unidades biogeográficas fue el fisonómico. Holmberg (1898) también definió nueve "Formaciones", respetando casi en su totalidad la nomenclatura de Lorentz salvo por la incorporación de una subdivisión en la "Formación de La Pampa". Rovereto (1914), dividió al territorio en ocho regiones sin nomenclatura pero caracterizadas. Hauman en su trabajo de 1920 reconoció ocho regiones para Argentina que luego modificó en 1931, definiendo diez regiones biogeográficas e implementando una nueva jerarquización del sistema de clasificación -en "Región, Dominio y Provincia"- que sería adoptada por trabajos posteriores. La zonificación de Kühn (1930) proponía diez regiones fitogeográficas. Parodi (1934) definió ocho formaciones vegetales que modificó levemente en su publicación de 1945 donde se registran un total de diez regiones. Frenguelli (1941) reconoció nueve unidades biogeográficas a las que definió como "Formaciones" y "Asociaciones". Castellanos y Pérez Moreau (1941, 1944) estuvieron entre los primeros investigadores en adoptar el término "Provincia" para la designación de las diez regiones fitogeográficas por ellos definidas. En 1953, Cabrera propone un esquema

que, a diferencia de los trabajos antes mencionados, basados casi exclusivamente en la fisonomía de la vegetación, empleó un sistema florístico para delimitar las trece provincias fitogeográficas que definió en el territorio argentino. Esta zonificación adoptó la nomenclatura de "Región, Dominio, Provincia y Distrito" y fue actualizada por el autor en sus posteriores publicaciones de 1971 y 1976 entre otras, este trabajo ha sido y es aún ampliamente utilizado. Finalmente, vale la pena mencionar el trabajo de Oyarzabal *et al.* (2018) quienes presentan un mapa fisonómico-florístico de la vegetación espontánea de la Argentina basándose en regionalizaciones preexistentes, observaciones de campo e interpretación visual de imágenes satelitales. Esta propuesta aplicó una jerarquización de la clasificación en "Región, Dominio, Provincia y Unidad de vegetación" y reconoció cincuenta unidades de vegetación agrupadas en un ecotono y once provincias fitogeográficas para Argentina.

Papadakis (1977) desarrolló una zonificación agroecológica para Argentina con el objetivo de aportar a la planificación agropecuaria del país. En la misma reconoció 6 grandes regiones geográficas en el territorio, a las que subdividió a su vez en regiones ecológicas basadas en características climáticas y del suelo, proponiendo un total de treinta y cuatro subunidades ecológicas sobre las que analizó las posibilidades de uso productivo -agrícola, silvícola o pecuario- de la tierra. Burkart *et al.* (1999) propusieron una nueva zonificación para Argentina en la que reconocieron dieciocho regiones - quince continentales- delimitadas considerando la geomorfología, la hidrología, los suelos, la vegetación y el clima. Para definir las, adoptaron un concepto que tuvo amplia difusión en adelante, el de "Ecorregión", cuya definición según sus autores es "[...] Territorio geográficamente definido en el que dominan determinadas condiciones geomorfológicas y climáticas relativamente uniformes o recurrentes, caracterizado por una fisonomía vegetal de comunidades naturales y semi-naturales que comparten un grupo considerable de especies dominantes, una dinámica y condiciones ecológicas generales, y cuyas interacciones son indispensables para su persistencia a largo plazo (Burkart *et al.* 1999)". El trabajo de Brown y Pacheco (2006) representa una propuesta de actualización a la zonificación de Burkart *et al.*, donde se revisó la delimitación de las ecorregiones que concentraron buena parte del proceso de transformación de ambientes naturales en agroecosistemas, éstas fueron, Yungas, Selva Paranaense, Pampa, Chaco Húmedo y Chaco seco. Esta propuesta combina información derivada de

imágenes satelitales, fuentes bibliográficas e información proveniente del conocimiento de los autores sobre las ecorregiones (Brown y Pacheco 2006). Finalmente, uno de los trabajos más recientes y de más amplia difusión, fue la zonificación en ecorregiones de Morello *et al.* (2012), que surgió con la idea de proveer una base para unificar criterios de regionalización en Argentina e integró para este objetivo información biofísica -clima, geología, geomorfología, suelos, cuerpos de agua, vegetación, fauna- y social -influencia antrópica-. La jerarquización que adoptó esta clasificación fue de "Ecorregión, Subregión y Complejos de Ecosistemas". Reconocieron 115 complejos ecosistémicos, agrupados en 15 ecorregiones.

Si bien ambos enfoques de clasificación pueden ser utilizados para el manejo ecosistémico, en las zonificaciones biogeográficas las aproximaciones metodológicas referentes a los criterios empleados para establecer la delimitación de las unidades resultantes, rara vez son lo suficientemente explícitos. La delimitación de las unidades es subjetiva al conocimiento del observador sobre las características fisonómico-florísticas de la vegetación, de manera que las zonificaciones resultan poco objetivas. Aparece entonces la dificultad para repetir estos procedimientos por otros autores y/o en otros periodos, y obtener resultados similares (Ribichich 2002). Por otra parte, desde el enfoque biogeográfico se infiere el clima a partir de la vegetación y no se considera un modelo explicativo de las condiciones climáticas que limitan estas fisonomías, siendo el clima el factor que determina la distribución vegetacional y no viceversa (Odum 1945, Daubenmire 1956). Si además se consideran las evidencias de influencias históricas y regionales sobre los patrones actuales de la biodiversidad, se advierte que los esquemas biogeográficos no incorporan fácilmente tendencias de cambio ecosistémico por causas naturales o antrópicas, que actualmente resultan ser las más frecuentes, tanto así que se dificulta encontrar áreas no modificadas o antropizadas en el terreno (Natenzon *et al.* 1997). Surge así la necesidad de explorar y desarrollar aproximaciones ecológicas de zonificación que resulten integralmente novedosas, que presenten criterios objetivos de delimitación y que esos criterios sean constantes en el tiempo a fin de poder comparar los cambios de los sistemas ecológicos y poder proyectar escenarios futuros.

1.1.2 El modelo de Holdridge como sistema de zonificación ecológica

Holdridge (1947, 1967, 1979) desarrolló un sistema de zonificación ecológica fundado en la caracterización y cartografiado de unidades bioclimáticas. Este sistema tiene una base empírica y objetiva, y define las condiciones del funcionamiento de los ecosistemas a través de su principal unidad ecológica: la zona de vida (Lugo *et al.* 1999), alejándose de la existencia de un esquema estable de zonas de vegetación. El concepto de zona de vida fue originalmente desarrollado por Merriam en 1890 como un modo de caracterizar áreas con similares comunidades de plantas y animales. Merriam observó la correspondencia entre los cambios en las comunidades que se desarrollan a similar altitud, al aumentar la latitud, y los cambios observados, a una similar latitud, al aumentar la elevación. Dadas las relaciones de la latitud y altitud con varios factores climáticos, estas observaciones son una expresión de la importancia de las condiciones climáticas para la existencia de las distintas formas de vida y de las fisonomías de la vegetación (McColl 2005).

Una zona de vida de acuerdo al modelo de Holdridge es un conjunto natural de asociaciones que utiliza tres variables -biotemperatura media anual, precipitación total anual acumulada y cociente de evapotranspiración potencial- limitantes para el desarrollo de procesos biológicos, expresadas en rangos de escala logarítmica (Holdridge 1979). El empleo de la expresión del factor calor por medio de la biotemperatura y el uso de una progresión logarítmica en los incrementos del calor y la precipitación para obtener cambios significativos en las unidades de vegetación natural, se consideran las principales innovaciones del sistema de zonas de vida (Matteucci y Colma 1982).

El modelo de zonificación de Holdridge es un modelo de tipo correlativo, es decir, las unidades bioclimáticas que define pueden relacionarse de manera simple con la vegetación (Yates *et al.* 2000). Los modelos correlativos relacionan la presencia o abundancia de especies con gradientes ambientales y pueden proporcionar proyecciones sobre futuros patrones de distribución. También se conocen como modelos de entorno bioclimático, esta designación implica que se está estimando un espacio multivariado de factores climáticos -entorno- que se corresponde con las distribuciones de especies observadas (Araújo y Peterson 2012). Una de las principales

ventajas de los modelos correlativos es su relativa simplicidad, lo que facilita el desarrollo de modelos definidos de especies, que se basan en grandes conjuntos de datos disponibles -inventarios forestales, clima regional-. En particular, son frecuentes los trabajos que se basan en el uso de modelos correlativos para evaluar posibles respuestas de distribución de los organismos a escenarios climáticos futuros (Keenan *et al.* 2011). En circunstancias de disponibilidad limitada de conjuntos de datos regionales, los modelos correlativos son buenos métodos para abordar estudios de impacto climático (Yates *et al.* 2000), y a menudo resultan el recurso más práctico o el único disponible (Barve *et al.* 2011).

Argentina es un territorio de particular interés para analizar a través del sistema de zonas de vida de Holdridge, dado que ocupa un amplio rango latitudinal al sur de Sudamérica y posee un amplio rango altitudinal, se infiere que presenta una marcada heterogeneidad bioclimática y por tanto una gran riqueza de zonas de vida. En el país, la proporción entre el número de estaciones meteorológicas distribuidas y la superficie terrestre total -casi 2.792.000 km²-, es mucho menor a 1 estación por kilómetro cuadrado. Esta limitación en la disponibilidad de datos hace del sistema de Holdridge una opción eficaz, debido a la simplicidad del modelo y los mínimos requerimientos de aplicación, que actualmente se favorecen con la potencialidad de los *software* de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la disponibilidad de modelos climáticos locales y globales, cuya incertidumbre debe ser considerada al momento de interpretar los resultados de la zonificación y más aún al realizar proyecciones de cambio sobre la misma.

El modelo ecológico de zonas de vida, de aplicación global, fue implementado principalmente en las zonas tropical y subtropical de las Américas: Perú (Tosi 1960), Honduras (Holdridge 1962a), Nicaragua (Holdridge 1962b, Mendoza *et al.* 2001), Colombia (Espinal y Montenegro 1963), República Dominicana (OEA 1967), Venezuela (Ewel *et al.* 1968, Ewel *et al.* 1976), Paraguay (Holdridge 1969, Hartshorn 1977), Costa Rica (Tosi 1969), Panamá (Tosi 1971), Haití (Holdridge 1972), Puerto Rico (Ewel y Whitmore 1973), Bolivia (Tosi *et al.* 1975, Unzueta 1975), El Salvador (Holdridge 1975, Tosi y Hartshorn 1978), Guatemala (De la Cruz 1976), Brasil (Tosi 1983; Tres 2016), Ecuador (Cañadas Cruz 1983), Honduras (Holdridge 1962a) y Belice (Hartshorn *et al.* 1984). Así mismo, se aplicó en los Estados Unidos (Lugo *et al.* 1999), la República

Popular China (Yue *et al.* 2001), en Australia (Jia *et al.* 2012), la India (Chakraborty *et al.* 2013), Rusia (Krankina *et al.* 1997, Kirilenko y Salomon 1998, Wieder *et al.* 2006) y Pakistan (Nasir *et al.* 2015). También se desarrolló un mapa global de zonas de vida a escala de poco detalle (IIASA 1989).

Las unidades bioclimáticas resultantes del modelo de zonas de vida tienen nombres que refieren a tipos fisonómicos de vegetación, aunque las mismas pueden no corresponderse con la cobertura vegetal real del terreno. Esto se debe a que la zona de vida constituye únicamente la primera categoría jerárquica de las divisiones ambientales del modelo de Holdridge, y no incluye otros factores que afectan el tipo de vegetación. Sin embargo, es posible evaluar en qué medida estas unidades se corresponden con las fisonomías del terreno e incluso evaluar en base a esta correspondencia la distribución potencial de la vegetación bajo los posibles efectos del cambio climático.

El gran mosaico ambiental que posee Argentina intenta conservarse a través de la definición de muestras representativas, en lo que se conoce como el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP). Estas áreas son definidas geográficamente y administradas a fin de alcanzar objetivos específicos de conservación (SiFAP 2019). Sin embargo, la diversidad bioclimática puede no estar bien representada por este sistema. La implementación del modelo de zonas de vida de Holdridge provee un nuevo marco de análisis para el establecimiento de áreas de conservación y la evaluación del SNAP existente, aportando a la comprensión de la distribución de los sistemas ecológicos y la diversidad.

La planificación y el desarrollo de políticas para el manejo de los ecosistemas es otro aspecto fundamental que con frecuencia utiliza modelos de zonificación para analizar la potencialidad de uso de la tierra. La asociación entre los patrones de uso de la tierra y las variables biofísicas que los condicionan se aplica con frecuencia para evaluar las probabilidades de transición entre tipos de cobertura (Paruelo *et al.* 2006), en este sentido el enfoque ecológico de zonas de vida resulta una herramienta objetiva que permite incorporar tendencias de cambio ecosistémicas y proyectar escenarios futuros.

La posibilidad de modelar las variaciones en la distribución de las zonas de vida debidas a la variación del clima, a través de las proyecciones de cambio climático, hace de este sistema una zonificación dinámica. Establecer las tendencias futuras de cambio y sus posibles implicancias sobre las áreas prioritarias para conservación y sobre los distintos usos de la tierra, permitiría establecer sugerencias que aporten a mejorar la planificación y el manejo del territorio.

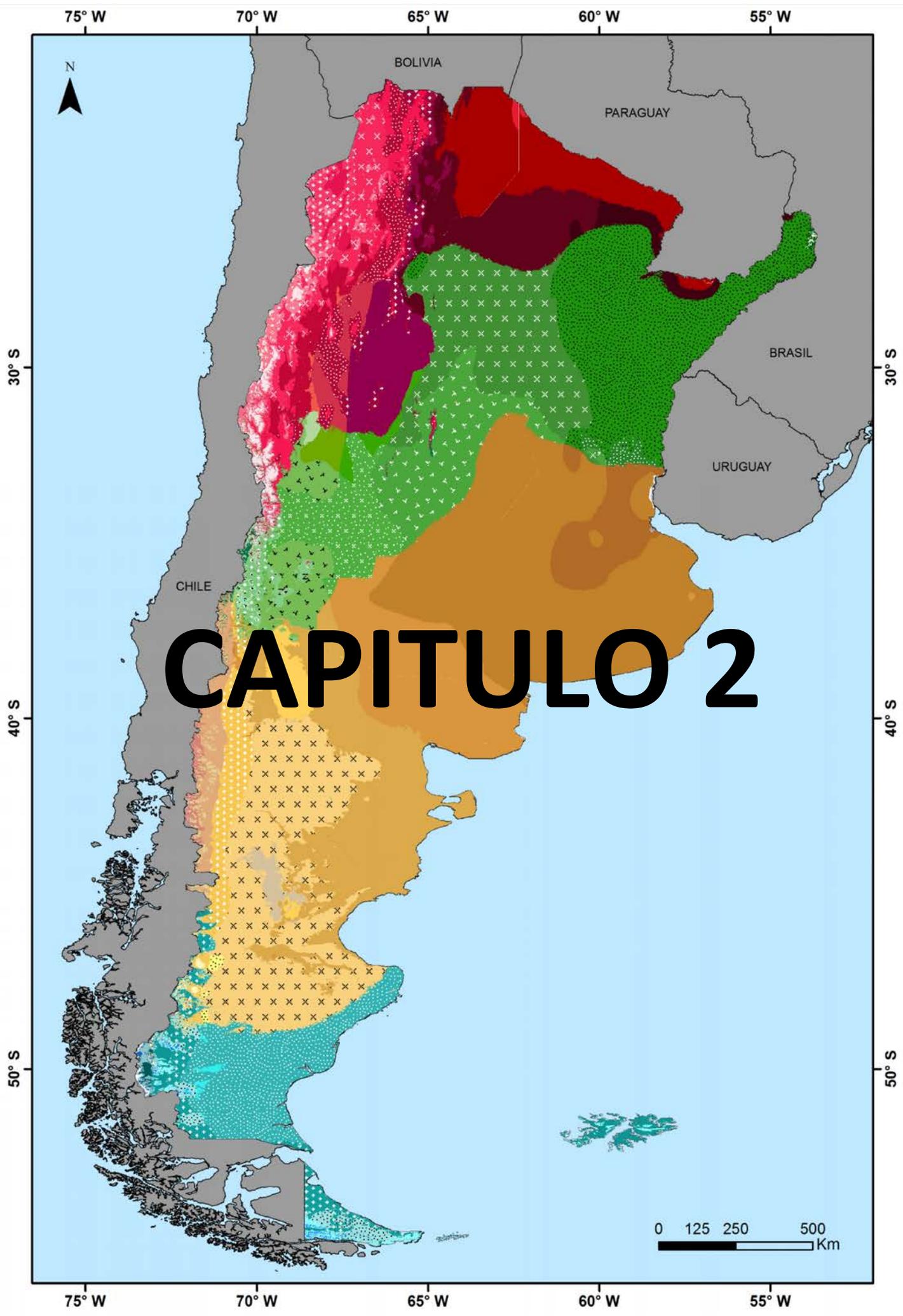
1.2 Objetivo

Definir y cartografiar las unidades bioclimáticas de Argentina -zonas de vida- como un sistema objetivo para cuantificar la diversidad ecológica del país, entender el marco ambiental donde se desarrolla el uso de la tierra y la gestión de la conservación de la biodiversidad, y evaluar los posibles impactos del cambio climático.

1.3 Estructura de la tesis

Este trabajo de tesis se estructura en 5 capítulos. En el Capítulo 1 se trata el marco teórico de referencia y contiene el objetivo general de este trabajo. El Capítulo 2 aborda la aplicación del sistema de zonas de vida en Argentina, cuántas zonas de vida se registran en el territorio, cuáles son, cómo se distribuyen. Se desarrolla la metodología de generación del mapa de zonas de vida, con la definición de una nueva línea de heladas ajustada al bioclima de nuestro país. Los resultados de este capítulo son la base para el desarrollo del trabajo de tesis. En el Capítulo 3 se realiza una evaluación de la incertidumbre de los modelos climáticos locales (MCL) utilizados para la construcción del mapa y se la compara con el grado de desacuerdo entre los MCL y los modelos climáticos globales (MCG). Este análisis no sólo permite establecer un nivel de confianza para la delimitación de las zonas de vida resultantes en el período actual, sino también para las proyecciones de cambio que pudiera sufrir la zonificación debido a los posibles cambios en el clima. En el Capítulo 4 se tratan algunas de las posibles aplicaciones del sistema de zonificación -cambio climático, conservación de la biodiversidad y uso de la tierra-. Se presentan los mapas de zonas de vida basados en las proyecciones de cambio climático definidas para Argentina aplicando modelos climáticos globales disponibles. Por otra parte, se busca determinar un punto de comparación entre la zonificación ecológica de zonas de vidas y una de las

zonificaciones del país de más amplio uso, la zonificación por ecorregiones (Morello *et al.* 2012). En esta comparación se evalúa, con datos climáticos actuales, cuáles son las ecorregiones más distintivas bioclimáticamente; cuáles son las ecorregiones con mayor diversidad bioclimática; y cuál es la relación entre las ecorregiones de acuerdo a las zonas de vida que contienen. Estos últimos procedimientos se replican con datos climáticos proyectados a futuro para detectar posibles cambios en las ecorregiones. Por otra parte, se analiza la representación de las zonas de vida en el Sistema Nacional de Áreas Protegidas de Argentina con el fin de evaluar si la diversidad bioclimática se encuentra bien representada. En este mismo capítulo se analiza la relación entre la distribución de las zonas de vida y la de los principales usos de la tierra en el país. Al igual que con ecorregiones, se evalúa con datos climáticos actuales, cuáles son los usos de la tierra desarrollados en áreas con características bioclimáticas más distintivas; cuáles son los usos de la tierra que se desarrollan en áreas con mayor diversidad bioclimática; y cuál es la relación entre los usos de la tierra de acuerdo a las zonas de vida que contienen. Estos procedimientos también se replican con datos climáticos proyectados a futuro para detectar posibles cambios en las áreas destinadas a los distintos usos. Además, siguiendo la propuesta de Lugo y Morris (1982), donde se agrupa a las zonas de vida en cuatro grandes categorías de acuerdo a su aptitud de uso, se evalúa en qué medida el uso del territorio desarrollado en Argentina coincide con esta propuesta planteada para la planificación de un manejo más apto de la tierra. En el Capítulo 5 se desarrolla una discusión final que vincula los contenidos de la totalidad de capítulos que componen la tesis. En este sentido se discuten preguntas como: ¿Resuelve el sistema de zonas de vida la representación de la diversidad climática de Argentina no contemplada por otras zonificaciones? ¿Son los cambios climáticos proyectados para el país, detectados por este sistema? ¿Es el sistema de zonas de vida una zonificación que aporte a mejorar la gestión de la planificación territorial?



CAPITULO 2. ZONAS DE VIDA DE ARGENTINA

2.1 Introducción

Una zonificación ecológica del territorio resulta un paso sustancial en el diseño de la gestión para el manejo de los ecosistemas. El sistema de zonas de vida define unidades bioclimáticas homogéneas en el territorio a partir de la vinculación de tres factores climáticos, biotemperatura media anual, precipitación total anual acumulada y relación de evapotranspiración potencial. La biotemperatura comprende sólo las temperaturas medias anuales entre 0 y 30°C, a las cuales se estima que tiene lugar el crecimiento de la vegetación en relación con el período anual. La precipitación anual acumulada es la cantidad de agua líquida y sólida caída cada año por unidad de superficie. La relación de evapotranspiración potencial es el cociente entre la evapotranspiración potencial media anual (cantidad de agua máxima que puede evaporar y transpirar un ecosistema) y la precipitación. Esta relación resulta un buen indicador de las condiciones de humedad del ecosistema y define por tanto las provincias de humedad (Figura 1).

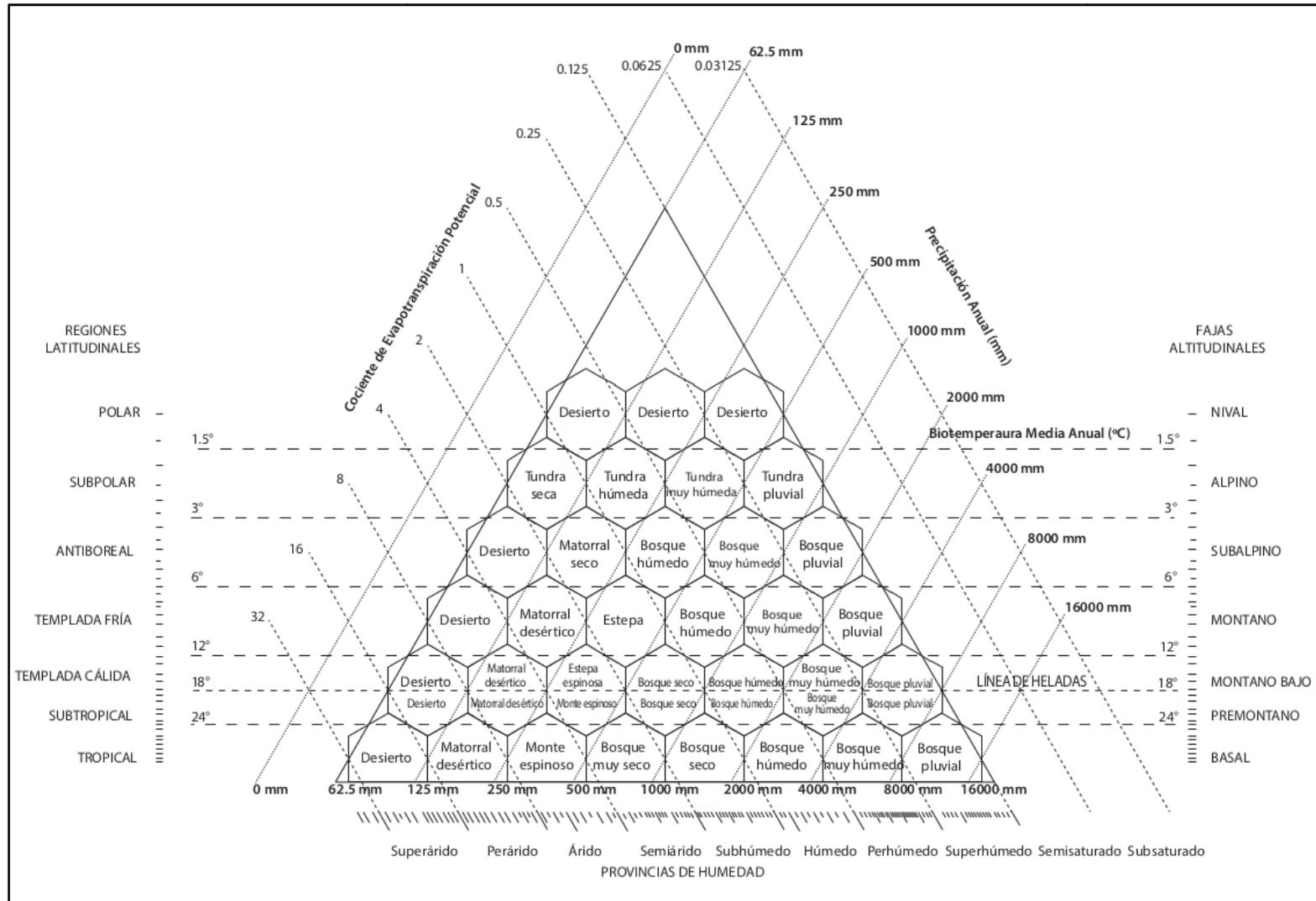


Figura 1. Diagrama para la identificación de las zonas de vida de Holdridge (Holdridge 1979).

A su vez, el sistema considera la posición de las zonas de vida en regiones latitudinales, en función de la distribución del calor a nivel del mar (biotemperatura basal o biotemperatura proyectada a nivel del mar) y en fajas altitudinales, en función de la distribución de calor a nivel de superficie (biotemperatura) (Figura 2).

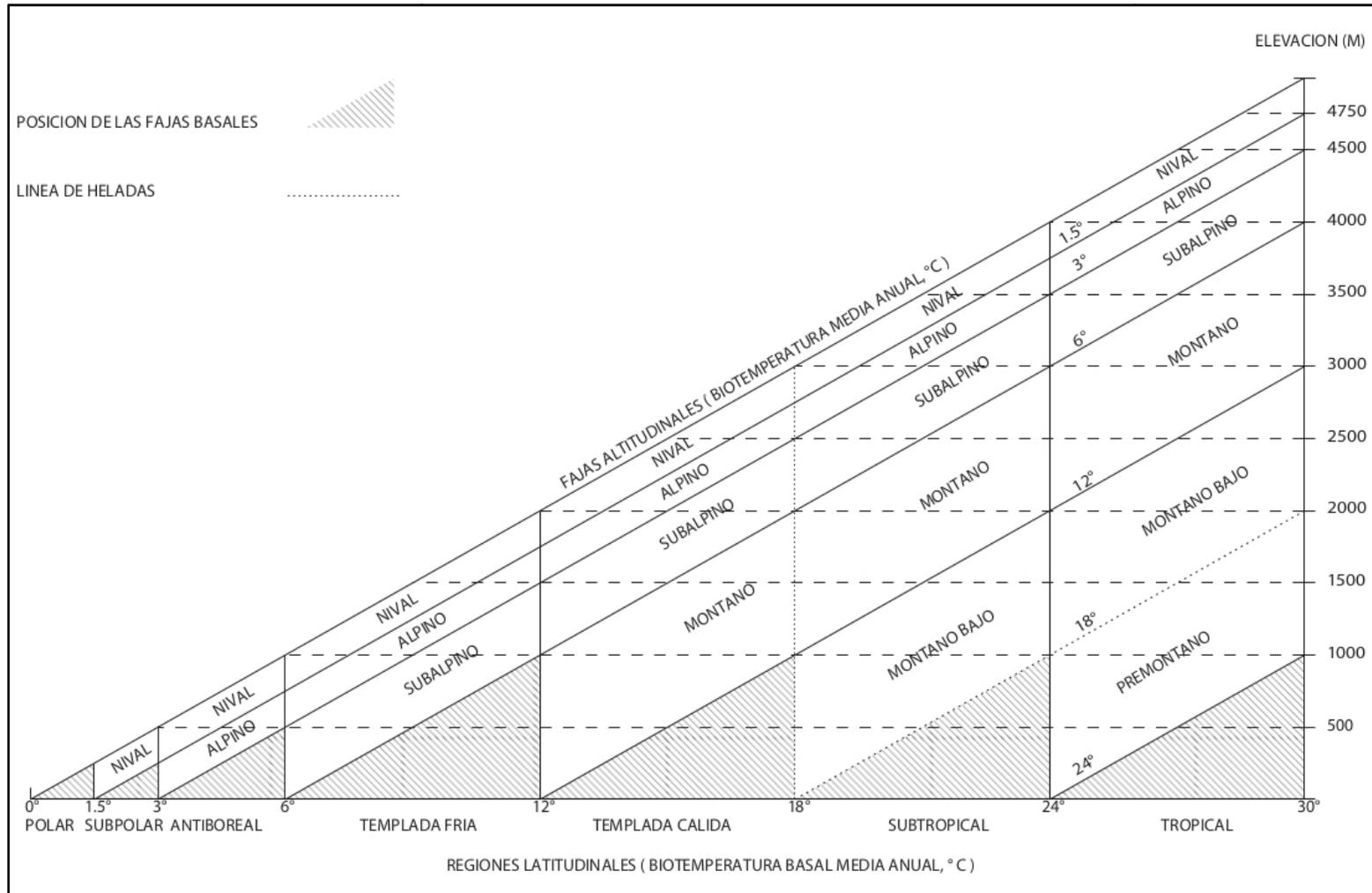


Figura 2. Diagrama para la definición de las regiones latitudinales y las fajas altitudinales del sistema de zonas de vida de Holdridge (Holdridge 1979).

Es importante tener en cuenta que si bien las zonas de vida tienen nombres que refieren a tipos fisonómicos de vegetación, las mismas pueden no corresponderse con la cobertura vegetal real del terreno. Esto se debe a que la zona de vida constituye únicamente la primera categoría jerárquica de las divisiones ambientales del modelo de Holdridge, y no incluye otros factores que afectan el tipo de vegetación como suelos, salinidad, drenaje, pendiente, fuertes vientos o nieblas y los variados patrones de distribución de la precipitación (Jiménez-Saa 1993). Estas variables están contempladas en un segundo nivel de clasificación: la asociación, unidad natural en la que la vegetación, la geografía física, la formación geológica y el suelo, están interrelacionados en una combinación reconocida y única, que tiene un aspecto o fisonomía típica (Holdridge 1979).

El objetivo de este capítulo fue aplicar el modelo de zonas de vida de Holdridge para la República Argentina a fin de evaluar la heterogeneidad ambiental bioclimática.

2.2 Materiales y métodos

2.2.1 Área de estudio

La República Argentina cubre 2.791.810 Km² y se extiende en un rango latitudinal desde las proximidades del Trópico de Capricornio en la confluencia de los ríos Grande de San Juan y Mojinete (21°46' S), Provincia de Jujuy, hasta el Cabo San Pío (55° 03' S), situado en la isla Grande de Tierra del Fuego (IGN 2016).

La heterogeneidad de ambientes en el país ha sido considerada resultado de diversos cambios relacionados al mencionado rango latitudinal, tales como la temperatura, la morfología y la ubicación del país en el cono sur de Sud América, relativa a las masas de agua oceánicas, las corrientes de aire y agua, y la Cordillera de los Andes (Morello y Mateucci 2000). Además, el país está conformado por diferentes provincias geológicas (Ramos 1999a).

Relieve y geología

La Argentina presenta un relieve y geología complejos, pero de manera muy general se puede destacar principalmente el gran contraste entre el oeste montañoso y el oriente de planicies (Figura 3).

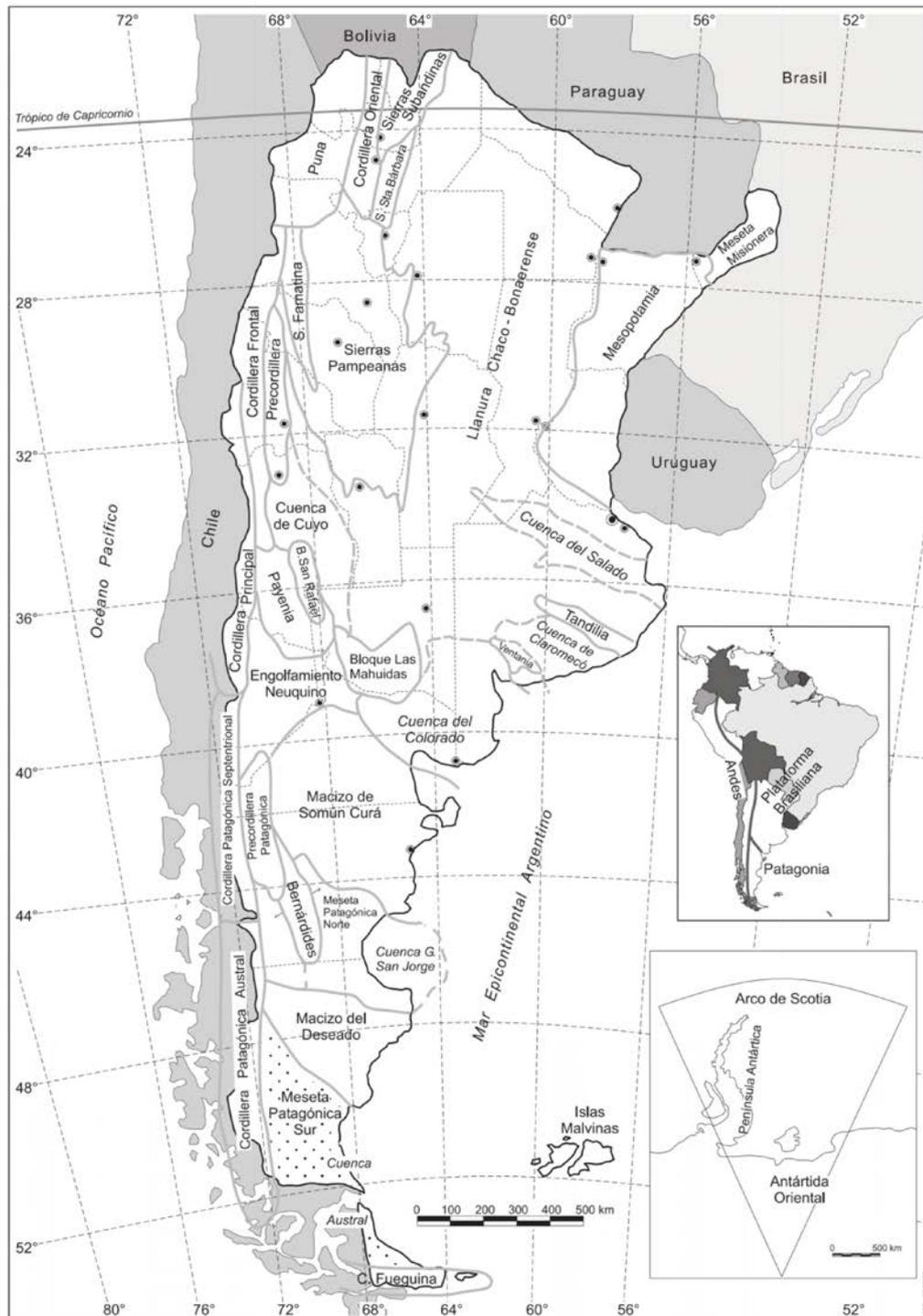


Figura 3. Provincias geológicas de Argentina. Fuente: Ramos 1999a.

El contraste se debe a la extensa y elevada cordillera de los Andes, asociada a otros sistemas montañosos más antiguos afectados por la orogenia andina. Este conjunto montañoso tiene una dirección dominante N-S en territorio continental, y su elevación disminuye en ese mismo sentido, con rasgos geomórficos diversos en los distintos tramos, originados en parte en las características que presentan los procesos de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana (Ramos 1999a, b, 2007). Por otra parte, el relieve montañoso elevado y de alta energía es la fuente de sedimentos que se depositan en los relieves bajos de las planicies orientales. Los ríos, tienden a fluir en el sentido general O-E, con la excepción de los grandes ríos que delimitan la Mesopotamia argentina que fluyen en sentido N-S (Morello y Mateucci 2000).

Tassara y Yáñez (2003) reconocen tres sectores cordilleranos en el ámbito argentino-chileno:

1-Andes Centrales (15 a 33,5°S): sector más elevado con cerros de más de 6000 m snm. (Ramos 1999a, 2007). En los Andes Centrales se hallan la cordillera Occidental, las altiplanicies y bolsones de la Puna con una cadena de volcanes activos, y las tierras plegadas y corridas de la cordillera Oriental y las Sierras Subandinas; además de una porción al sur (28 a 33°S) donde las cordilleras Principal y Frontal no están asociadas a volcanes activos.

2- Andes del Sur (33,5 a 47°S): en que la subducción presenta un ángulo de Benioff similar a la porción norte de los Andes Centrales pero que causa menor deformación, y hay volcanes activos (ej. el Tupungato) que forman una cadena magmática hacia el sur.

3- Andes Australes (47°S a 56°S): su tramo septentrional, continental, corresponde a los Andes patagónicos que van desde el volcán Lanín 3376 m snm hasta el Estrecho de Magallanes, con alturas medias de alrededor de 1500 a 2000 m y algunos picos de más de 3300 m snm (Ej. Tronador, 3478 m; Fitz Roy, 3375 m). Esta primera porción incluye una zona de transición sin actividad volcánica entre ca. 46 y 49°S, y los enormes campos de hielo continentales. La segunda porción es la más meridional y ocupa el extremo sur continental y el archipiélago Fueguino. En el archipiélago la Cordillera cambia su dirección N-S a O-E dando lugar a la Cordillera Fueguina, cuya altura máxima es el monte Darwin (2488 m snm), en el sector chileno de la Isla Grande de Tierra del Fuego. Esta orientación cordillerana es paralela a los vientos occidentales dominantes

y a la circulación oceánica circumpolar que baña las costas de la isla Grande de la Tierra del Fuego, la Isla de los Estados, y otros sistemas insulares.

Las planicies predominan al este de los Andes en la Llanura Chaco-Pampeana y las mesetas patagónicas (Figura 3). La Llanura Chaco-Pampeana es una vastísima planicie suavemente ondulada que se extiende, por el oriente, del norte al centro del país en una enorme cuenca sedimentaria cubierta por sedimentos de menos de 2 millones de años (Folguera y Zárate 2009). En su tramo norte, los ríos Pilcomayo, Bermejo, y Juramento-Salado atraviesan la planicie chaqueña de NO a SE. Por su límite oriental corren de norte a sur los ríos Paraguay y Paraná, asociados en territorio argentino con las cuencas de los ríos antes mencionados (Iriondo 1987). La componente chaqueña de la Llanura se extiende por el norte, centro y este de Argentina, y continúa más al norte por el sudoeste del Paraguay y sureste de Bolivia. Al oeste de la Llanura Chaco-pampeana, se disponen algunos sistemas montañosos de orientación general norte sur que forman cadenas discontinuas que se elevan notoriamente sobre ella pertenecientes a las sierras pampeanas, como por ejemplo los Nevados de Aconquija en Tucumán y Catamarca (C° del Bolsón, 5552 m snm), las Sierras Grandes de Córdoba (C° Champaquí, 2884 m snm) y las Sierras de San Luis en la provincia de igual nombre (C° Agua Hedionda, 2150 m snm). En la provincia de Buenos Aires, porción pampeana de la planicie, se encuentran dos sistemas montañosos de dirección general NO-SE, el septentrional bajo (Tandilia, C° La Juanita 524 m snm) y el meridional más alto (Ventania, C° Tres Picos 1238 m snm) al cual se le ha atribuido un efecto de enfriamiento zonal (Burgos 1968). En la provincia de La Pampa se hallan las sierras Mahuidas de La Pampa (*e.g.* Lihue Calel, Choique Mahuida y Pichi Mahuida), con algunos cerros aislados, redondeados por la erosión y muy bajos (ca.600 m snm). La planicie pampeana alcanza su límite con la Patagonia a aproximadamente 39°S.

En el Este del territorio argentino se encuentran las tierras de la Mesopotamia, formadas por terrenos suavemente ondulados en la provincia de Entre Ríos, dominio de llanuras y esteros en la de Corrientes, y serranías en Misiones cuya máxima elevación es el Cerro Alegría (843 m snm) ubicado en el NE de la provincia.

La meseta patagónica está ubicada al sur de la Falla de Huincul que se extiende de Oeste a Este a ca. 39°S (Ramos *et al.* 2004). En su parte occidental, bordeando los Andes hay una angosta faja con sierras, lomas, y pequeñas planicies, donde son

frecuentes los mallines. En el sur de la Patagonia no son raros los depósitos de arenas al este de los lagos al pie de la cordillera que tienen su borde oriental en la Patagonia extra-andina. Pero la Patagonia tiene, en su mayoría, una geomorfología caracterizada por mesetas escalonadas de oeste a este que van desde unos 1000 msnm hasta el nivel de la costa, donde hay cuencas endorreicas. También presenta montañas, colinas, bajos, dunas, valles de ríos caudalosos nacidos en la zona cordillerana, costas acantiladas, playas y rías.

El archipiélago de las Islas Malvinas posee un relieve que ha sido trabajado por glaciares hasta hace pocos miles de años, y presenta suaves colinas con las máximas alturas localizadas hacia el norte de las dos islas principales: el Monte Adam (Isla Gran Malvina) de 700 msnm, y el Pico Alberdi (Isla Soledad) de 705 m snm (Aldiss y Edwards 1999, Otley *et al.* 2008).

Componentes del clima y condiciones climáticas resultantes

La marcada oceaneidad del Hemisferio Sur se magnifica en el cono sur de América, y tiene un fuerte efecto regulador del clima en general, y de las temperaturas en particular (Frangi *et al.* 2015). Este gran estrechamiento continental a latitudes templadas y frías acentúa la influencia marítima sobre el continente e islas, atenuando las temperaturas extremas de verano e invierno, lo que resulta en amplitudes térmicas bajas (Morello 1986). A su vez, la cordillera de los Andes, y algunos sistemas montanos elevados, producen un efecto notorio en las temperaturas de superficie, la circulación del viento y la distribución de las precipitaciones.

Diferentes componentes climáticos principales intervienen en la circulación de masas de aire y en el transporte, distribución y régimen de las precipitaciones en el territorio argentino:

1- La ubicación y comportamiento de los anticiclones semiestacionarios localizados en el océano Pacífico sur oriental (ca. 25-35° S – 90° O) y en el Atlántico sur (ca. 20-35°S), que se desplazan hacia el norte en invierno y al sur en verano (cf. Hoffmann 1992). El anticiclón del Pacífico sur oriental interviene en el papel que juegan los vientos permanentes del oeste a alta latitud donde dominan todo el año; de esa relación entre ambos se establece la estacionalidad invernal de las precipitaciones en el sur de Chile y los Andes Australes en el continente, aportados por la masa de aire

polar marítima y el cono de sombra de lluvias, ocasionado por el descenso diabático al cruzar la cordillera, en la Patagonia extra-andina. Tras pasar la cordillera las masas de aire frío toman dirección este sobre la Patagonia extra-andina y noreste hacia menores latitudes. Al norte de los 40°S la gran elevación de los Andes Centrales limita el cruce de las masas de aire polar del Pacífico al territorio argentino. El Anticiclón del Atlántico genera una masa de aire húmedo que se encuentra con algunas tierras montanas de moderada elevación en el sudeste del Brasil que no alcanzan a impedir su aporte de precipitaciones a la Argentina al norte de los 40°S, en especial sobre el este del país con un máximo en la provincia de Misiones. Este anticiclón aporta así precipitaciones que dan lugar a un régimen isohigro en el Noreste argentino, el cual pasa gradualmente a un régimen de precipitaciones monzónico con máximas estivales en el que las precipitaciones decrecen hacia el oeste y centro del país con variaciones debidas a efectos orográficos. En verano las diferencias de presión entre los anticiclones oceánicos nombrados y la baja presión continental es mayor que durante el invierno, lo que contribuye al mayor aporte estival de precipitaciones en el norte del país.

2- La influencia de los anticiclones del Pacífico y Atlántico sur sobre el clima del noroeste argentino (NOA). Hacia el NO de la región se hacen cada vez más acentuadas las características tropicales (Bianchi *et al.* 2005), reguladas principalmente por cuatro sistemas relacionados: **(i)** La Alta Boliviana (AB), un centro de alta presión a 19° S y 60° O, que se nutre en la estación cálida del hemisferio sur de calor y humedad procedentes de la actividad convectiva sobre la cuenca del Amazonas y los Andes centrales (Ferreira *et al.* 2004). **(ii)** La Baja del Chaco (BCH), es un centro de baja presión confinado en la baja atmósfera del Gran Chaco que ocupa parte del Este de Bolivia, el Oeste del Paraguay y Norte de Argentina, y está vinculada con la AB. La BCH se origina en el calentamiento de la superficie debido a flujos radiativos y de calor sensible, y se presenta como un centro de baja presión relativamente débil y elongado meridionalmente desde la porción sur de la cuenca Amazónica hasta el noroeste de la Argentina. Se encuentra durante toda la estación lluviosa, y opera como una fuente de energía (Schwerdtfeger 1976, Ferreira 2008). **(iii)** La Baja del Noreste (BNE), es un centro de baja presión troposférico que acompaña al AB, que se ubica sobre la costa atlántica entre las latitudes 0° y 10°S. **(iv)** La Depresión del Noroeste Argentino (DNOA)

cuyo centro se encuentra ubicado a los 30° S – 66° O, recostada sobre las laderas orientales de las montañas, inmersa en el sistema ciclónico BCH, en ocasiones también localizada en latitudes cercanas a los 40°S (Lichtenstein 1980, Ferreira 2008, Ferreira *et al.* 2010). La DNOA está presente todo el año con una alta similitud estacional de frecuencia de eventos, un comportamiento intermitente mayor en invierno, y eventos de mayor duración e intensidad en verano (Ferreira 2008, Ferreira *et al.* 2010). A finales de noviembre la BCH se intensifica generando un aumento en el gradiente de presión en el centro de Sud América. Como resultado, la intensidad de los vientos alisios aumenta, produciendo un flujo positivo anómalo de humedad hacia el continente sudamericano. Los vientos que penetran desde el noreste son dirigidos hacia el sur del continente por los Andes, formando así la Corriente de Chorro Sud Americano de Nivel Bajo (CCSANB) que se manifiesta en una entrada de aire cálido tropical hacia el sur de Brasil y noroeste argentino, principalmente en verano (Lenters y Cook 1997, Marengo *et al.* 2002). Estos vientos de niveles bajos incorporan aire húmedo y como resultado ocurren precipitaciones sobre una zona denominada Zona de Convergencia Intertropical de Sud América (ZCISA) (Marengo *et al.* 2002, Lenters y Cook 1997, Saulo *et al.* 2010). Según Ferreira *et al.* (2010), la DNOA es un sistema de baja presión que ha recobrado importancia a partir del reconocimiento de su papel, junto con la BCH y la CCSANB, en los intercambios de masas de aire entre los trópicos y los extra-trópicos, modulando el transporte de calor y humedad a la porción sur de Sudamérica (Seluchi y Marengo 2000, Saulo *et al.* 2004, Vera *et al.* 2006).

3- Otros componentes intervinientes en el clima de Argentina son la localización de centros de alta y baja presión marinos y continentales que surgen bajo ciertas configuraciones sinópticas particulares en que se producen sudestadas, vientos zonda, ingresos de viento norte y avances de frentes fríos (Lamas y Maio 2011).

Las temperaturas en Argentina disminuyen de norte a sur, y con la altitud en los sectores montañosos elevados. La temperatura media anual en el norte, a baja elevación, es de cerca de 23°C, en tanto en Ushuaia es de ca. 5,8°C. Debido a la gran elevación de las montañas más elevadas del país (>6500 m), las temperaturas medias de sus cumbres son inferiores a 0°C. Al sur de los 35°S es notorio el efecto por un lado de enfriamiento al pie de la cordillera y, por otro, de atemperación de las aguas oceánicas, que indican las isotermas medias anuales, que van de noroeste a sureste.

Entre los 35°S y 27°S dichas isotermas muestran un patrón diferente, suavemente ondulado, que indican para una misma latitud, al este de los Andes y otros sistemas elevados, primero un efecto de enfriamiento montano, y luego una mayor temperatura al oeste y este del centro del país. A menos de 27°S, fuera de la zona pedemontana, el norte de la planicie chaqueña presenta temperaturas más o menos constantes a igual latitud.

La cordillera de los Andes, y algunos sistemas montanos elevados, producen un efecto notorio en las temperaturas de superficie, la circulación del viento y la distribución de las precipitaciones. Al norte de los 40°S, el comienzo de la estación de lluvias es indicado por la migración al sur de los vientos Alisios, y de la ZCISA (Kousky 1988, Liebmann y Marengo 2001) a través de la interacción entre los AB, BNE, BCH y DNOA, anteriormente descriptos. El avance de frentes calientes en Argentina, en general procedentes del noroeste, no prospera muy al sur como, a la inversa, los frentes fríos avanzan hacia el norte-noreste. Los mismos, al chocar con masas de aire cálido y húmedo, son los principales causantes de las precipitaciones en el Centro y NO del país (Woelken 1954, Kousky y Gan 1981). En esta región de la Argentina, las precipitaciones decrecen de este a oeste hasta las sierras Subandinas y la cordillera Oriental en cuyas laderas ascienden orográficamente para dar lugar a un aumento de precipitaciones hasta que a cierta elevación inician un descenso de las mismas con el incremento altitudinal y, en la Puna, sobre el altiplano, van desde ca.400 mm en La Quiaca hasta la casi ausencia de lluvias en la frontera con Chile (Atacama). En el noroeste argentino, sin embargo, hay una gran heterogeneidad de situaciones climáticas, que se expresa con la presencia de muy distintos tipos de vegetación (Cabrera 1971, 1976, Buitrago 1999, Bianchi *et al.* 2005) tales como selvas, bosques, pastizales y vegetación de Prepuna y Puna. Sobre la vertiente cordillerana argentina, ca. 27° a 31°S, las precipitaciones invernales son algo mayores; entre los 31° y 33°S precipitan ca. 400 mm y entre los 35° y 36°S es de unos 1000 mm (Matteucci 2012). Por otra parte, en el extremo NE de Argentina, en la provincia de Misiones el régimen es isohigro.

Entre los 40° y 60° S dominan los vientos occidentales permanentes. En el territorio continental los vientos occidentales se enfrentan con el tramo sur de la cordillera andina superando esa barrera relativamente baja y manifestando un efecto

Föhn, por el que la mayor precipitación ocurre en los flancos occidentales en territorio chileno -alcanzando los 5000 a 10000 mm anuales- y disminuyen abruptamente hacia el océano Atlántico, donde las precipitaciones son escasas. Sobre los Andes australes del continente la baja altitud permite una precipitación sobre las laderas que alcanzan los 1000 a 5000 mm.

A ca. 52° S, en el extremo sur del continente y en Tierra del Fuego, los vientos del oeste corren paralelos a la cordillera fueguina, y junto a las condiciones oceánicas extremas mantienen bajas temperaturas todo el año, baja amplitud térmica, y dan lugar a un régimen isohigro de lluvias todo el año. En Tierra del Fuego la temperatura disminuye y la precipitación anual aumenta con la elevación, en tanto la nieve está presente en los picos de las montañas aún en los meses más cálidos (Iturraspe *et al.* 1989, Frangi *et al.* 2004).

Finalmente, las corrientes oceánicas contribuyen en la determinación de los climas de Argentina, particularmente la circulación oceánica del cono sur de América (Piola y Matanó 2001, Bastida *et al.* 2007, Piola 2008, FCMAP 2008, De Haro 2012). La corriente fría circumpolar de aguas subantárticas circunvala el planeta a alta latitud (40 a 60°S) impulsada por los vientos occidentales permanentes de altas latitudes del Hemisferio Sur. Esa circulación es facilitada por un corredor oceánico circumpolar interrumpido parcialmente por el extremo sur de Sudamérica (56°S) que forma una barrera incompleta, lo que genera que el archipiélago austral quede rodeado por aguas frías con muy baja amplitud térmica, lo que define un clima oceánico extremo.

2.2.2 Fuentes de datos climáticos

Los datos climáticos utilizados para establecer las zonas de vida se obtuvieron a partir del Atlas Climático Digital de la República Argentina, del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) (Bianchi y Cravero 2010). El Atlas del INTA provee información climática a escala nacional como datos grillados o de tipo raster con una resolución espacial de 1 km. En este trabajo se emplearon la precipitación total anual acumulada y la temperatura media anual calculada a partir de las temperaturas medias mensuales. Los datos climáticos del INTA derivaron de información histórica que cubrió distintos periodos de tiempo. En particular el mapa de precipitación derivó de

un mapa de isohietas confeccionado con datos de 1921 a 1951, utilizando procedimientos de interpolación espacial y correcciones por parte de expertos locales (Bianchi com. pers.). Las temperaturas mensuales se obtuvieron mediante un modelo lineal que utilizó la altitud, latitud y precipitación, ajustado con datos de temperatura del periodo 1986-2000, la capa de precipitación total anual acumulada, y un modelo digital de elevación (Bianchi y Cravero 2010).

Puesto que la intención de la determinación de zonas de vida fue representar las mismas en función de las condiciones climáticas actuales, se estableció la relación entre los datos provenientes del Atlas Climático del INTA con la temperatura y precipitación del período 1981-2010 suministrada por el Servicio Meteorológico Nacional, correspondiente a observaciones registradas en 80 estaciones meteorológicas distribuidas a lo largo del territorio nacional. La comparación de ambos conjuntos de datos para los 80 mismos sitios se realizó mediante el coeficiente de correlación de Pearson.

2.2.3 Variables que definen las zonas de vida, regiones latitudinales y fajas altitudinales

Biotemperatura

La Biotemperatura es un parámetro que está relacionado con los procesos fisiológicos de la vegetación. Temperaturas promedio inferiores a 0°C y mayores a 30°C hacen que los procesos fisiológicos se vean disminuidos y por lo tanto, estos valores representan los límites de temperatura que definen a la biotemperatura en el modelo de Holdridge. Así, se propone que todos los valores por fuera de este rango, es decir, temperaturas inferiores a 0°C o superiores a 30°C sean tomados como 0°C (Holdridge 1967). En el presente trabajo se asumió que la vegetación que se halla en climas con temperaturas promedio superiores a 30°C presenta una fisiología y fisonomía propias de climas cálidos, y por tanto se consideró más apropiado reemplazar los valores de temperatura mayores de 30°C por 30°C y no por 0°C. De esta manera, partiendo de temperaturas medias mensuales (TMM) se estimaron las Biotemperaturas Medias Mensuales (BMM), reemplazando aquellos valores menores a 0°C por 0°C y aquellos

valores mayores a 30°C por 30°C. Posteriormente, las BMM se promediaron para generar la Biotemperatura Media Anual (BMA) (Ecuación 1).

$$BMM = [(TMM \leq 0) * 0 + (TMM > 0) * TMM] + [(TMM \leq 30) * TMM + (TMM > 30) * 30]$$

*= se reemplaza

$$BMA = \sum_{x=1}^{12} BMM_x / 12 \quad (1)$$

Precipitación

Se trabajó con la precipitación total anual acumulada en mm (PTA) tal y como fue procesada por Bianchi y Cravero (2010).

Cociente de evapotranspiración potencial

El cociente de evapotranspiración potencial (EVP/P) se obtuvo integrando las capas de BMA y PTA, de acuerdo a Holdridge (1959) (Ecuación 2).

$$(EVP/P) = (BMA \times 58.93) / PTA \quad (2)$$

Como se mencionó anteriormente, el cociente EVP/P se considera un buen indicador de las condiciones de humedad ecosistémica (Yue *et al.* 2001). Los rangos logarítmicos del cociente EVP/P definen las provincias de humedad (Holdridge 1967).

Regiones latitudinales y fajas altitudinales

Los límites de las regiones latitudinales se establecieron a partir de la Biotemperatura Basal Media Anual (BBMA), esto es, la biotemperatura considerada a nivel del mar (Holdridge 1959). Para transformar los valores de Biotemperatura a sus valores equivalentes a nivel del mar se aplicó la tasa de gradiente vertical media global de -6.0°C/km usada por Holdridge (1967). Esta tasa se aplicó a cada temperatura media mensual (TMM), usando datos de elevación (m) derivados de un modelo digital de elevación del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM 2001 - Servicio Geológico de Estados Unidos, www.earthexplorer.usgs.gov) (Ecuación 3). Las capas resultantes, de temperatura basal media mensual (TBMM) se ajustaron nuevamente al rango de 0°C a 30°C, transformándolas en Biotemperatura Basal Media Mensual (BBMM) (Ecuación 4) y finalmente fueron promediadas para obtener la BBMA (Ecuación 5).

$$TBMM = (DEM \times 0.006) + TMM \quad (3)$$

$$BBMM = [(TBMM \leq 0) * 0 + (TBMM > 0) * TBMM] + [(TBMM \leq 30) * TBMM + (TBMM > 30) * 30] \quad (4)$$

*= se reemplaza

$$BBMA = \sum_{x=1}^{12} BBMM_x / 12 \quad (5)$$

El límite entre las regiones templada cálida y subtropical está dado por la línea de heladas, máxima biotemperatura a la que aún se registran heladas y que Holdridge define en 18°C, valor medio del rango biotérmico de 12 a 24°C del modelo (Holdridge 1967). De acuerdo a Lugo *et al.* (1999), la zona de heladas puede definirse en términos prácticos como aquella donde se registren temperaturas menores o iguales a 0°C al menos una vez al año durante veinte años consecutivos.

Debido a que los datos de temperatura del mapa del INTA representan un valor medio estimado mediante un modelo no fue posible analizar el cumplimiento de la condición de heladas para una serie de años como requiere el criterio de Lugo *et al.* (1999). En consecuencia, el cumplimiento de la condición de heladas se evaluó sobre la base de datos anuales del periodo 1981-2010 provistos por el Servicio Meteorológico Nacional, para estaciones con temperatura media anual mayor a 18°C y una altitud inferior a 1000 msnm. Una vez identificadas espacialmente las estaciones, se definió a partir del dato de BBMA calculado para esos sitios un nuevo valor de línea de heladas, a partir del promedio de los valores de BBMA de esas estaciones meteorológicas. También se calcularon límites de confianza para el valor de línea de heladas definido, y a partir de ese nuevo valor se trazó la línea de heladas para el país.

Finalmente, las fajas altitudinales se definieron de acuerdo a Holdridge (1967) a partir de la relación entre BMA y el rango de BBMA de cada región latitudinal (Fig. 2).

2.2.4 Determinación de las zonas de vida

Las variables bioclimáticas estimadas (BMA, PTA, EVP/P y BBMA) fueron categorizadas en los distintos rangos logarítmicos propuestos por la clasificación de Holdridge (Fig. 1), se combinaron para definir las zonas de vida y luego asignarlas a una región latitudinal y faja altitudinal (Fig.2).

Existen zonas de transición o zonas ecotonales, que se disponen en áreas de contacto entre hexágonos de diferentes regiones latitudinales y fajas altitudinales

(Figura 4). Al aplicar el modelo, los puntos del territorio que se localicen en estas zonas de transición se asignan a la zona de vida más cercana, estimando la distancia con respecto al centroide del hexágono que representa la zona de vida (Holdridge, 1967). En el presente trabajo, las zonas de transición fueron asignadas a las distintas zonas de vida a través del procedimiento de clasificación supervisada, basado en las variables indicadas aplicando el algoritmo de distancias mínimas (Chakraborty *et al.* 2013).

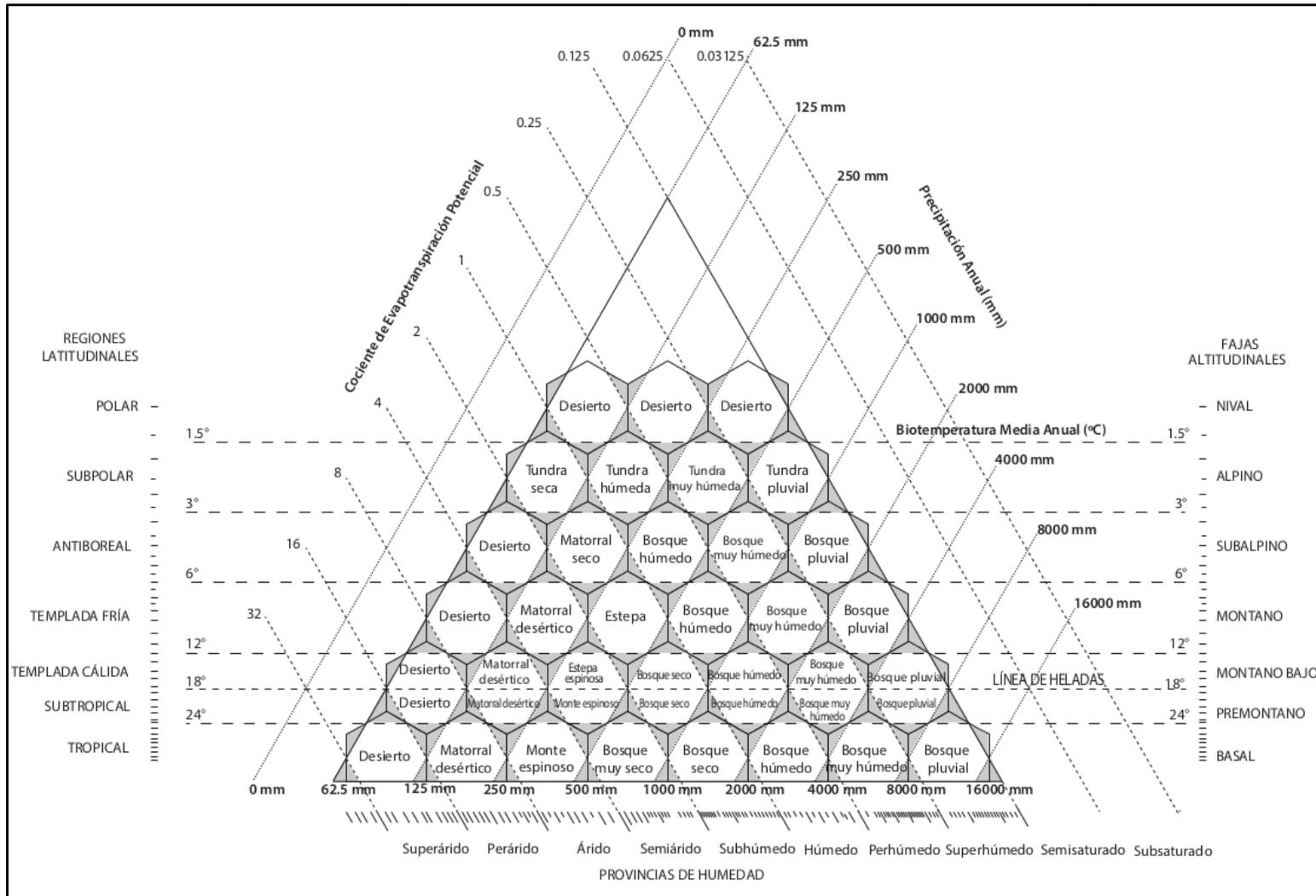


Figura 4. Zonas de contacto entre hexágonos o zonas de transición. Modificado de Holdridge (1967).

Durante la determinación de las zonas de vida, algunos puntos se ubicaron fuera de los límites del diagrama original de Holdridge y por lo tanto se requirió identificar las nuevas zonas de vida que los contenían, estableciendo nuevos rangos a partir de los criterios de Holdridge. Con este objetivo, una vez ubicados los puntos, delimitados los nuevos hexágonos y asignadas la región y faja correspondiente, se usaron los nombres de las provincias de humedad con las que estas unidades se hallaron vinculadas para componer un nuevo nombre. Vale la pena mencionar que Holdridge (1979, pág. 10) advirtió acerca de la presencia en el mundo de otras condiciones locales no representadas en su esquema, indicadoras de la existencia de otras zonas de vida que representan extensiones del diagrama; este es el caso hallado en Argentina.

El producto final del análisis es un mapa de zonas de vida con una resolución espacial de 1 km, escala 1:1500000, con una unidad mínima cartografiable de 300 ha (3 km²). Las variables utilizadas para la construcción del mapa estaban originalmente en el Sistema de Referencia de Coordenadas (SRC) WGS84, una vez obtenido el mapa de zonas de vida esta capa fue proyectada a un SRC planas para el cálculo de las áreas de las unidades bioclimáticas en hectáreas, el SRC elegido fue el UTM zona 20 Sur. Los análisis se realizaron en su mayoría con *software* de licencia libre y gratuita -QGIS 2.14, R-, también se usó ArcGIS 10.1 con licencia de la Universidad Nacional de Avellaneda.

2.3 Resultados

2.3.1 Verificación de la calidad de los datos climáticos

La comparación estadística de la temperatura media anual y precipitación anual, medida en 80 estaciones del SMN y los datos correspondientes suministrados por el Atlas del INTA, resultó en una correlación significativa para la temperatura ($r=0,9458$, $p<0,0001$) y la precipitación ($r=0,9898$, $p<0,0001$) (Figura5). En consecuencia, el total de los datos del Atlas Climático del INTA se consideró adecuado para la determinación de zonas de vida.

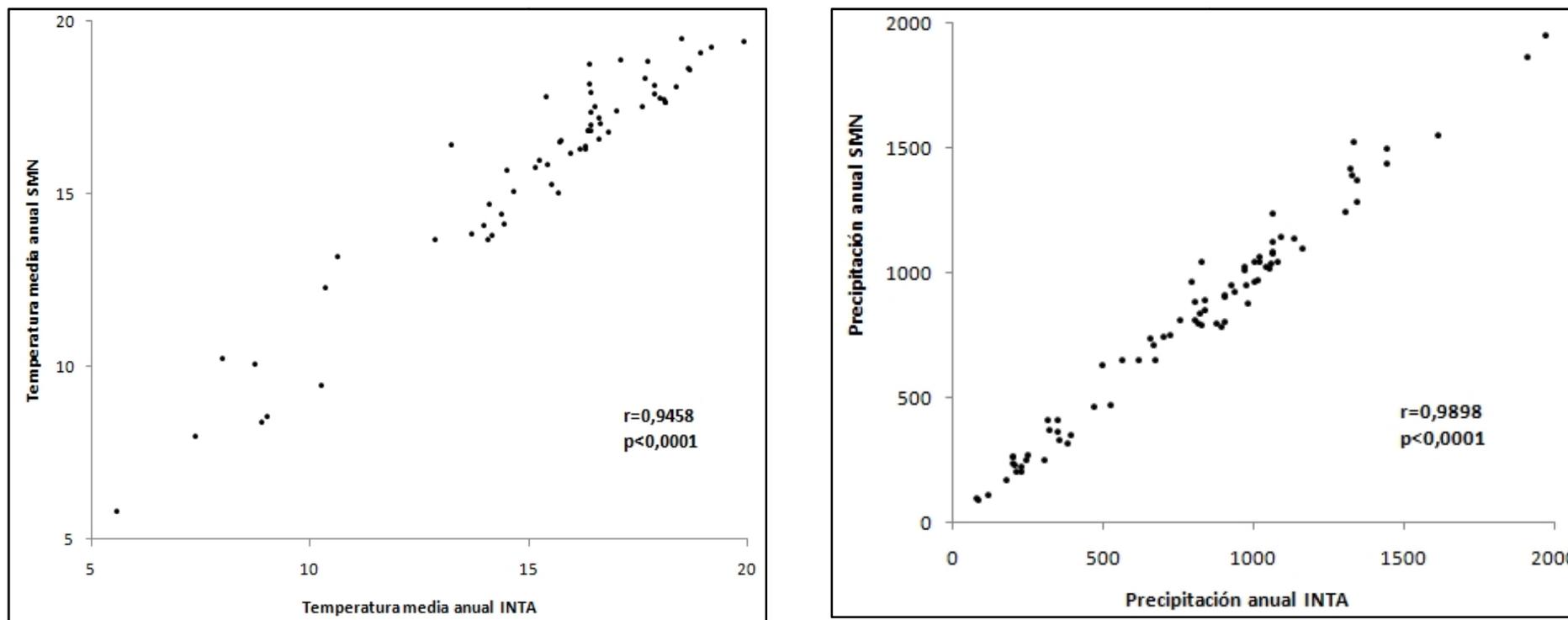


Figura 5. Correlación entre los datos de temperatura media anual del aire y precipitación anual registrados por el SMN (1981-2010) en 80 estaciones meteorológicas, y los datos para estas localidades suministrados por el modelo del Atlas Climático del INTA.

2.3.2 Variables bioclimáticas

A partir de los datos climáticos del INTA se calcularon las variables bioclimáticas, biotemperatura media anual (BMA), precipitación total anual (PTA), cociente de evapotranspiración potencial (EVP/P) y biotemperatura basal media anual (BBMA) que fueron categorizadas en los rangos logarítmicos propuestos por Holdridge (1967) y luego combinadas en la aplicación del sistema de zonificación en el territorio argentino (Figura 6).

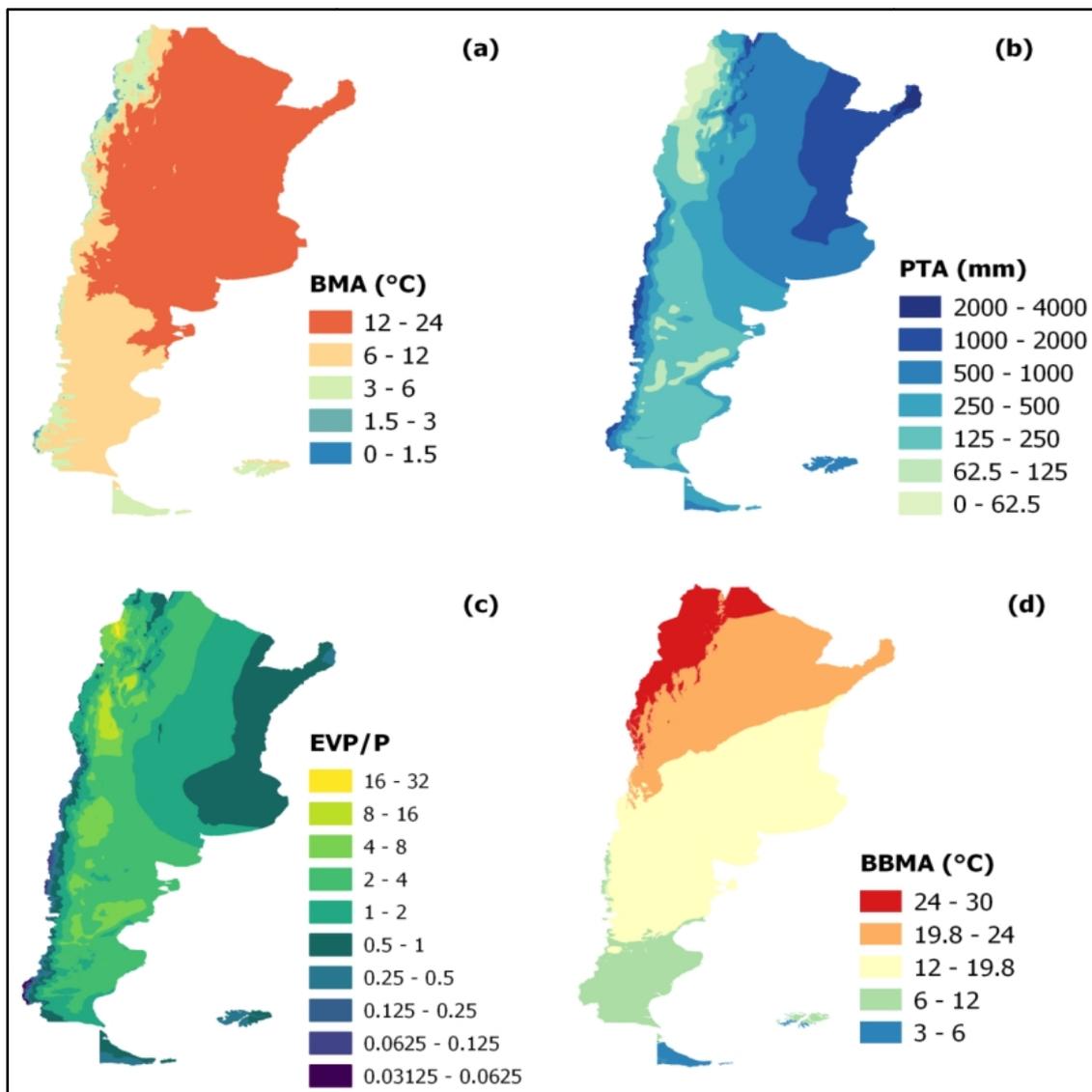


Figura 6. Variables bioclimáticas (Holdridge 1967). BMA= biotemperatura media anual, PTA= precipitación total anual acumulada, EVP/P= cociente de evapotranspiración potencial y BBMA= biotemperatura basal media anual.

2.3.3 Línea de heladas (o línea crítica)

El valor determinado para la línea de heladas ajustada a nuestro territorio representó una media (\bar{x}) de 19,8°C, con un desvío estándar (S) de 1,27, y límites de confianza al (95%) superior e inferior de 20,5°C ($(\bar{x}) + (t_{2,13, 0.95} \times S)$) y 19°C ($(\bar{x}) - (t_{2,13,0.95} \times S)$) respectivamente.

La diferencia geográfica más notoria entre el empleo de uno u otro cálculo (v.g., 18° o 19,8°C) ocurre hacia el este del país (Figura 7).

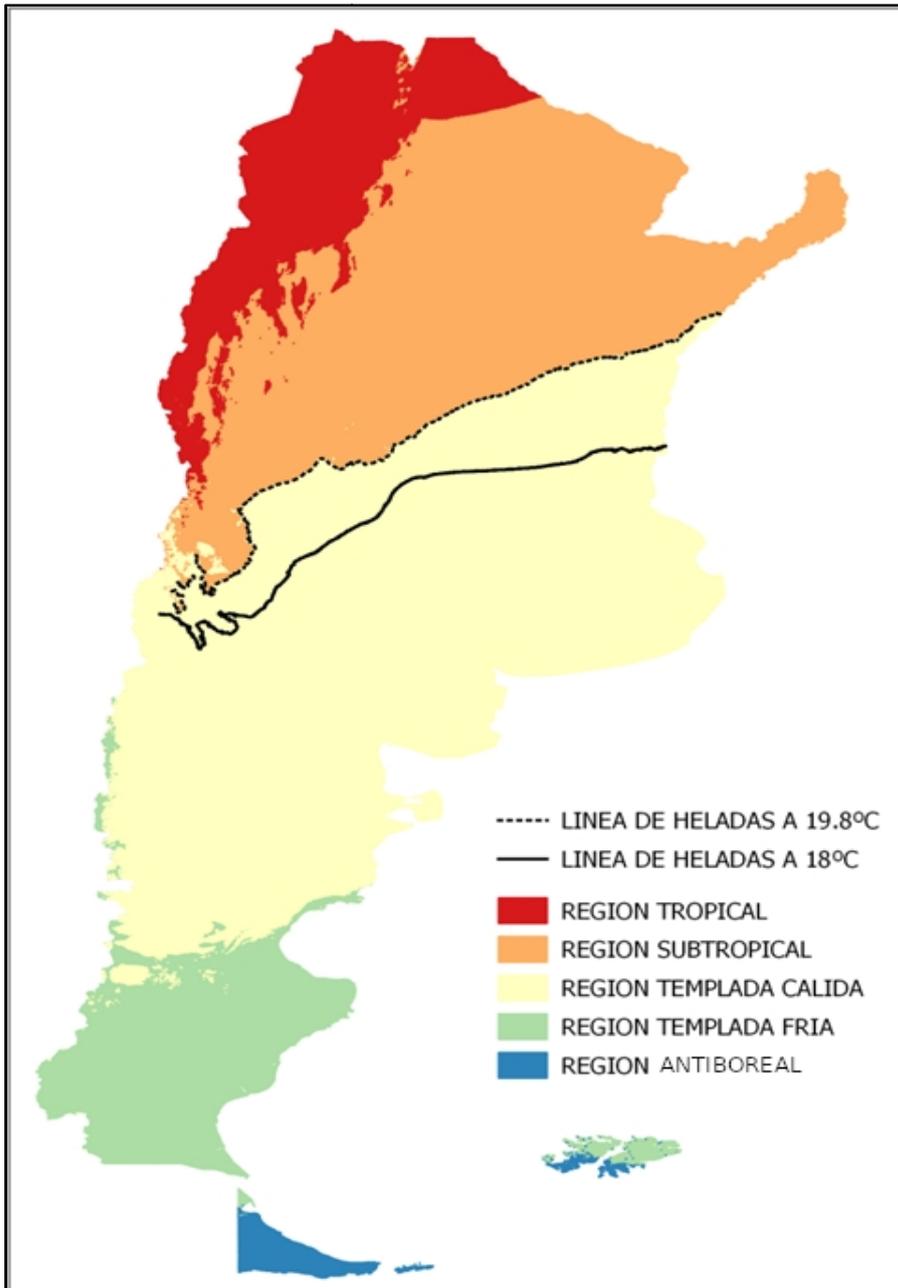


Figura 7. Línea de heladas para Argentina en 18°C (según Holdridge 1967) y en 19,8°C, nuevo valor definido en Derguy *et al.* 2019b

2.3.4 Regiones latitudinales, fajas altitudinales y provincias de humedad

Se reconocieron para el territorio argentino 5 regiones latitudinales y 7 fajas altitudinales. Las 5 regiones latitudinales definidas, desde tropical a antiboreal, de acuerdo a la nomenclatura de Holdridge (1967), presentaron un patrón de límites distribuidos espacialmente en sentido NE-SO, orientación que se acentúa del Sur al Norte del país (Figura 8). La región latitudinal más extensa es la templada cálida (45% del territorio), distribuida en el Centro y parte del Sur del país, seguida por la región subtropical (33%) con una distribución en el Norte y Noreste del país. La región de menor extensión fue la antiboreal con menos del 1% al Sur del territorio (Tabla 1, Figura 8). Las regiones tropicales y subtropicales sustentan el mayor número de zonas de vida (24-25), seguido por las regiones templadas (15-16) y por último la antiboreal (3) (Tabla 1).

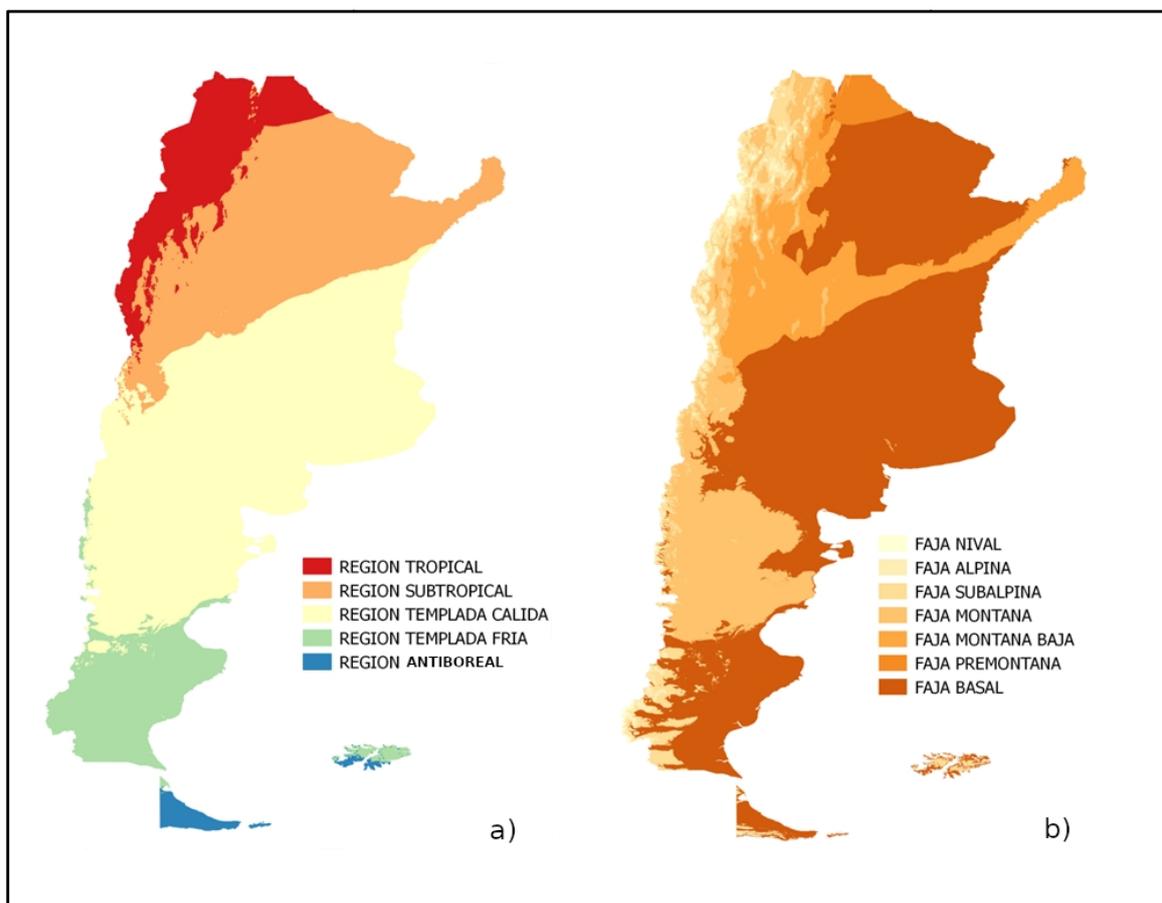


Figura 8. Regiones latitudinales (a) y fajas altitudinales (b) en Argentina.

Tabla 1. Distribución de zonas de vida por región latitudinal.

Región latitudinal	Zonas de vida (N°, %)	Superficie (% del área total)
Tropical	25 (30,1)	11
Subtropical	24 (28,9)	33
Templada Cálida	16 (19,3)	45,5
Templada Fría	15 (18,1)	9,4
Antiboreal	3 (3,6)	0,8
Total Argentina	83 (100)	100,0

Nota: área total de Argentina 2.797.333 Km² calculada a partir de un Sistema de Referencia de Coordenadas UTM 20 zona Sur.

Las siete Fajas Altitudinales definidas, desde Basal a Nival, de acuerdo a la nomenclatura de Holdridge (1967), presentan una distribución espacial heterogénea (Figura 8, Tabla 2). La faja altitudinal más extensa es la Faja Basal (59% del territorio), lo que reflejó la gran extensión de las tierras bajas (o con alturas aproximadas menores a 1500 msnm) (Figura 8 Y 9, Tabla 2) y la alta representación de esta faja en cada región latitudinal con excepción de la Región Tropical donde no se registró Faja Basal (Tabla 3). La faja de menor extensión fue la Nival con menos del 1% del territorio (Tabla 2). Respecto de la Faja Premontana, el límite térmico inferior de esta faja corresponde a la línea de heladas calculada en 19,8°C que, como se indicó anteriormente, es un valor de biotemperatura mayor al propuesto por Holdridge (1967). Dos de las consecuencias del valor de línea de heladas calculado son: (i) el límite altitudinal superior aproximado se ubicó a una menor elevación que la que resultaría de aplicar una línea de heladas a 18°C, y (ii) la Faja Premontana resultó con una superficie menor que la que se obtendría empleando la línea de heladas original del modelo.

Tabla 2- Distribución de las zonas de vida en fajas altitudinales.

Faja altitudinal	Zonas de vida (Nº, %)	Superficie (% del área total)
Nival	3 (3,6)	0.6
Alpino	17 (20,5)	1.8
Subalpino	17 (20,5)	6.4
Montano	15 (18,1)	15.8
Montano Bajo	13 (15,7)	14.6
Premontano	2 (2,4)	1.9
Basal	16 (19,3)	58.9
Total Argentina	83 (100)	100

Nota: área total de Argentina 2.797.333 Km²calculada a partir de un Sistema de Referencia de Coordenadas UTM 20 zona Sur.

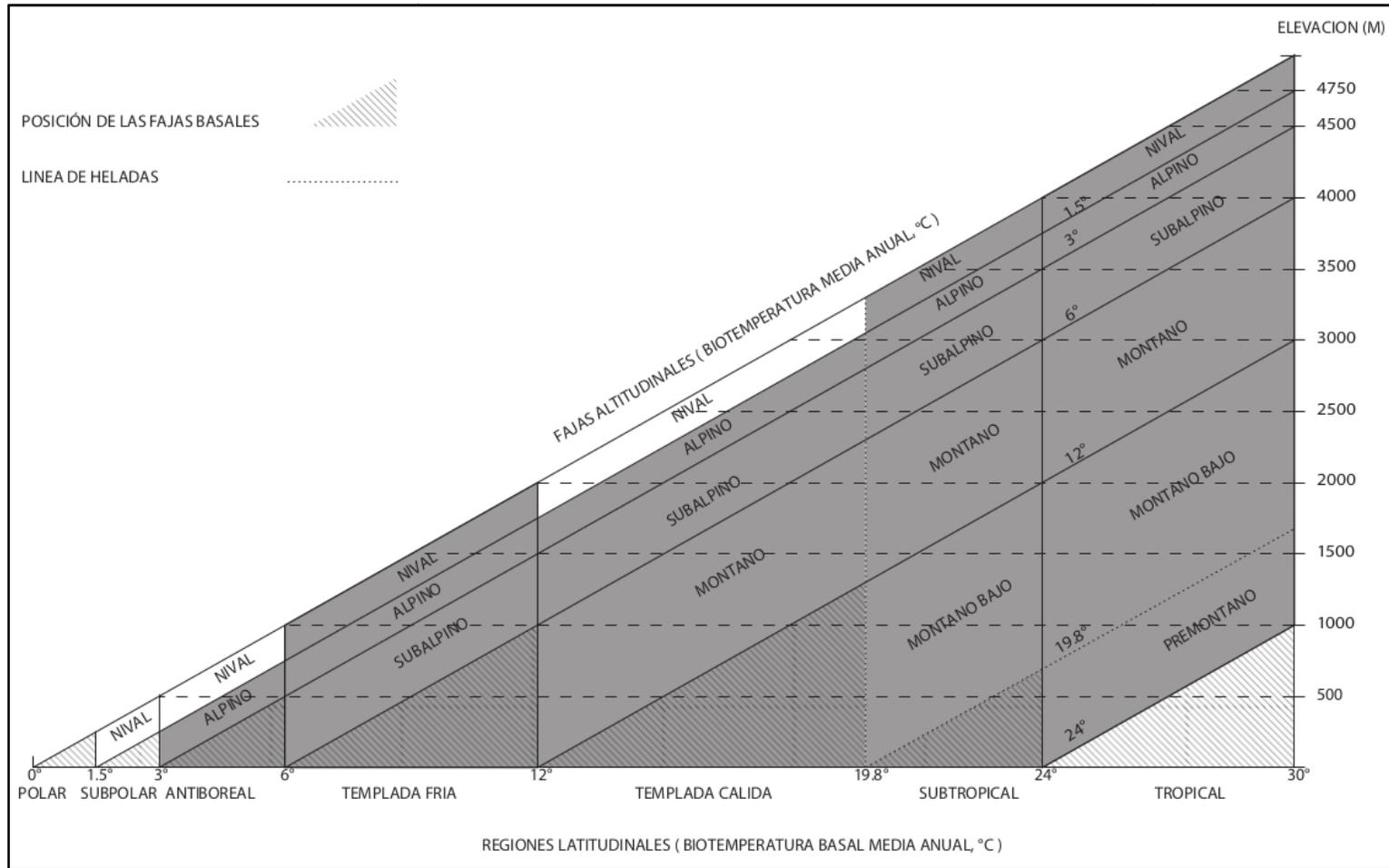


Figura 9 Diagrama de Holdridge con las fajas altitudinales registradas en Argentina (en gris) distribuidas por región latitudinal. Modificado de Holdridge (1967).

Tabla 3. Superficie (Km²) de la Faja Basal en cada región, y porcentaje de esa superficie en relación al total basal y al total de su propia región latitudinal.

Región	Área Km ² (% de Faja Basal total)	% del total de la región
Tropical	0 (0)	0
Subtropical	490115 (29,72)	52,68
Templada Cálida	937506 (56,86)	73,63
Templada Fría	201558 (12,22)	76,57
Antiboreal	19759 (1,20)	90,78
Total Argentina	1648938	(100)

La distribución de las zonas de vida en las provincias de humedad incluyó desde la Superárida a la Subsaturada. Las provincias de humedad que ocuparon mayor extensión fueron la Semiárida (978.000 Km²) y Subhúmeda (875.565 Km²). Esto implica que cerca del 63% del territorio presentó niveles de EVP que fueron de 2 a 4 veces superiores a la PTA. Mientras tanto, 604.224 Km², poco más del 20% del territorio, presentaron valores similares de EVP y PTA, correspondientes a la provincia Húmeda. Un área de 95.109 Km², un 3.4 % del territorio, presentó un balance de agua positivo donde la EVP fue inferior a la PTA. Por último, 11,1 % del territorio resultó ser Árido a Superárido con un cociente de evapotranspiración potencial de 4 a 32 (Tabla 4, Figura 10).

Tabla 4. Distribución de las zonas de vida en provincias de humedad.

Provincias de humedad	Zonas de vida (Nº, %)	Superficie (% del área total)
Superárido	1 (1,2)	0.17
Perárido	2 (2,4)	2.03
Árido	10 (12,0)	8.91
Semiárido	12 (14,6)	32.60
Subhúmedo	13 (15,7)	31.30
Húmedo	16 (19,3)	21.59
Perhúmedo	15 (18,1)	2.42
Superhúmedo	7 (8,4)	0.66
Semisaturado	5 (6,0)	0.24
Subsaturado	2 (2,4)	0.07
Total Argentina	83 (100)	100.00

Nota: área total de Argentina 2.797.333 Km²

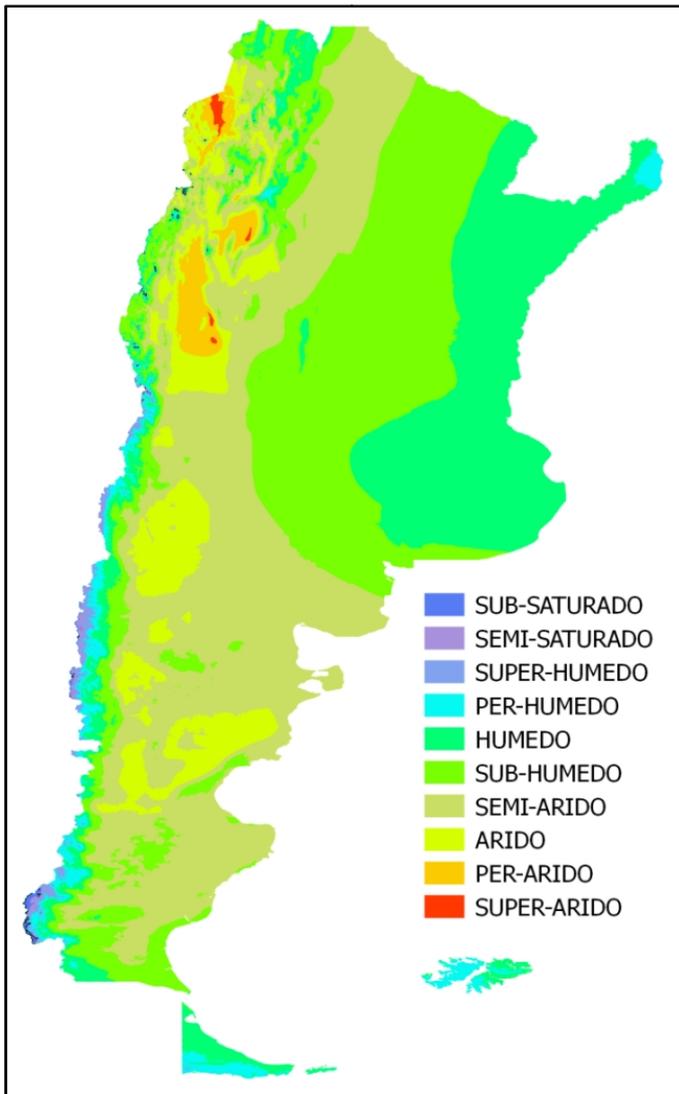


Figura 10. Provincias de humedad definidas para Argentina

2.3.5 Zonas de vida

Se determinó un total de 83 zonas de vida (Figura 11 y 12, Tabla 5). Las zonas de vida de mayor extensión geográfica se hallaron en la Región Subtropical y Templada Cálida e incluyeron Bosque Seco Templado Cálido (433.600 Km² o 15 %), Bosque Seco Subtropical (276.300 Km² o 9 %), Estepa Espinosa Templada Cálida (227.900 Km² u 8 %), y Matorral Desértico Montano Templado Cálido (192.614 Km² o 7%). Las de menor extensión incluyeron: Bosque Muy Húmedo Montano Bajo Tropical (170 Km²), Tundra Muy Húmeda Alpina Templada Cálida (183 Km²) y Tundra Húmeda Alpina Subtropical (234 Km²). Se registraron 11 zonas de vida que excedieron los límites del diagrama original (Tabla 6, Figura 12). El total de 83 zonas de vida halladas en Argentina están listadas en la Tabla 5.

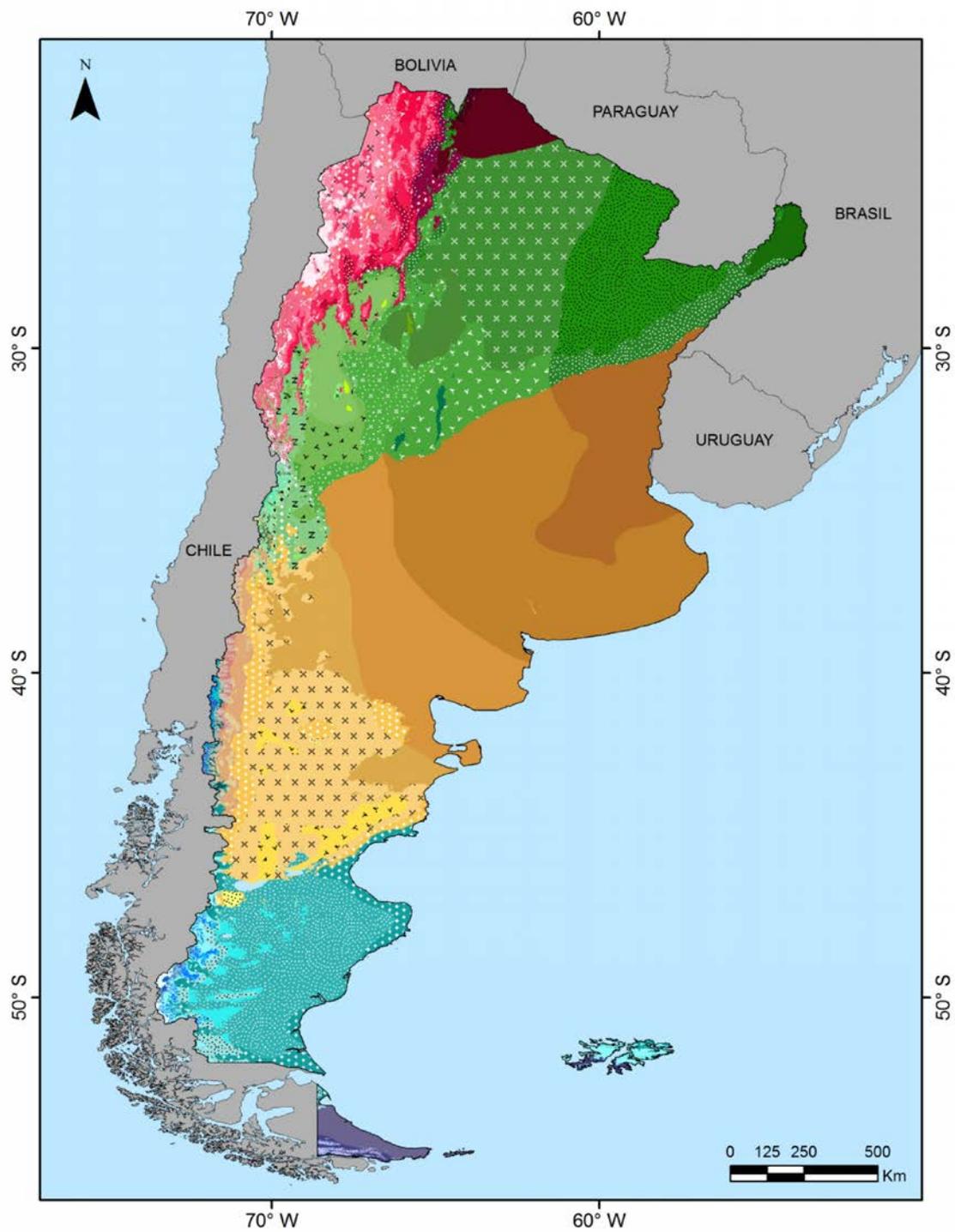


Figura 11. Mapa de Zonas de Vida de Argentina y leyenda en la página siguiente

ZONAS DE VIDA	
	BOSQUE HÚMEDO ANTIBOREAL (BHAB)
	BOSQUE MUY HÚMEDO ANTIBOREAL (BMHAB)
	TUNDRA PLUVIAL ALPINA ANTIBOREAL (TPAAB)
	DESIERTO TEMPLADO FRÍO (DTF)
	MATORRAL DESÉRTICO TEMPLADO FRÍO (MDTF)
	ESTEPA TEMPLADA FRÍA (ETF)
	BOSQUE HÚMEDO TEMPLADO FRÍO (BHTF)
	BOSQUE MUY HÚMEDO TEMPLADO FRÍO (BMHTF)
	MATORRAL SECO SUBALPINO TEMPLADO FRÍO (MSSTF)
	BOSQUE HÚMEDO SUBALPINO TEMPLADO FRÍO (BHSTF)
	BOSQUE MUY HÚMEDO SUBALPINO TEMPLADO FRÍO (BMHSTF)
	BOSQUE PLUVIAL SUBALPINO TEMPLADO FRÍO (BPSTF)
	BOSQUE SEMISATURADO SUBALPINO TEMPLADO FRÍO (BSSSTF)
	TUNDRA MUY HÚMEDA ALPINA TEMPLADA FRÍA (TMHATF)
	TUNDRA PLUVIAL ALPINA TEMPLADA FRÍA (TPATF)
	TUNDRA SEMISATURADA ALPINA TEMPLADA FRÍA (TSSATF)
	TUNDRA SUBSATURADA ALPINA TEMPLADA FRÍA (TSUBSATF)
	DESIERTO SUBSATURADO NIVAL TEMPLADO FRÍO (DSUBSNTF)
	MATORRAL DESÉRTICO TEMPLADO CÁLIDO (MDTC)
	ESTEPA ESPINOSA TEMPLADA CÁLIDA (EETC)
	BOSQUE SECO TEMPLADO CÁLIDO (BSTC)
	BOSQUE HÚMEDO TEMPLADO CÁLIDO (BHTC)
	DESIERTO MONTANO TEMPLADO CÁLIDO (DMTC)
	MATORRAL DESÉRTICO MONTANO TEMPLADO CÁLIDO (MDMTC)
	ESTEPA MONTANA TEMPLADA CÁLIDA (EMTC)
	BOSQUE HÚMEDO MONTANO TEMPLADO CÁLIDO (BHMTC)
	BOSQUE MUY HÚMEDO MONTANO TEMPLADO CÁLIDO (BMHMTTC)
	MATORRAL SECO SUBALPINO TEMPLADO CÁLIDO (MSSTC)
	BOSQUE HÚMEDO SUBALPINO TEMPLADO CÁLIDO (BHSTC)
	BOSQUE MUY HÚMEDO SUBALPINO TEMPLADO CÁLIDO (BMHSTC)
	BOSQUE PLUVIAL SUBALPINO TEMPLADO CÁLIDO (BPSTC)
	TUNDRA MUY HÚMEDA ALPINA TEMPLADA CÁLIDA (TMHATC)
	TUNDRA PLUVIAL ALPINA TEMPLADA CÁLIDA (TPATC)
	TUNDRA SEMISATURADA ALPINA TEMPLADA CÁLIDA (TSSATC)
	MATORRAL DESÉRTICO SUBTROPICAL (MDS)
	SUBTROPICAL THORN WOODLAND (STW)
	BOSQUE SECO SUBTROPICAL (BSS)
	BOSQUE HÚMEDO SUBTROPICAL (BHS)
	BOSQUE MUY HÚMEDO SUBTROPICAL (BMHS)
	DESIERTO SUPERÁRIDO MONTANO BAJO SUBTROPICAL (DSAMBS)
	DESIERTO MONTANO BAJO SUBTROPICAL (DMBS)
	MATORRAL DESÉRTICO MONTANO BAJO SUBTROPICAL (MDMBS)
	ESTEPA ESPINOSA MONTANA BAJO SUBTROPICAL (EEMBS)
	BOSQUE SECO MONTANO BAJO SUBTROPICAL (BSMBS)
	BOSQUE HÚMEDO MONTANO BAJO SUBTROPICAL (BHMBS)
	BOSQUE MUY HÚMEDO MONTANO BAJO SUBTROPICAL (BMHMBBS)
	DESIERTO MONTANO SUBTROPICAL (DMS)
	MATORRAL DESÉRTICO MONTANO SUBTROPICAL (MDMS)
	ESTEPA MONTANA SUBTROPICAL (EMS)
	BOSQUE HÚMEDO MONTANO SUBTROPICAL (BHMS)
	MATORRAL SECO SUBALPINO SUBTROPICAL (MSSS)
	BOSQUE HÚMEDO SUBALPINO SUBTROPICAL (BHSS)
	BOSQUE MUY HÚMEDO SUBALPINO SUBTROPICAL (BMHSS)
	TUNDRA HÚMEDA ALPINA SUBTROPICAL (THAS)
	TUNDRA MUY HÚMEDA ALPINA SUBTROPICAL (TMHAS)
	TUNDRA PLUVIAL ALPINA SUBTROPICAL (TPAS)
	TUNDRA SEMISATURADA ALPINA SUBTROPICAL (TSSAS)
	DESIERTO SEMISATURADO NIVAL SUBTROPICAL (DSSNS)
	BOSQUE SECO PREMONTANO TROPICAL (BSPT)
	BOSQUE HÚMEDO PREMONTANO TROPICAL (BHPT)
	DESIERTO MONTANO BAJO TROPICAL (DMBT)
	MATORRAL DESÉRTICO MONTANO BAJO TROPICAL (MDMBT)
	ESTEPA ESPINOSA MONTANA BAJO TROPICAL (EEMBT)
	BOSQUE SECO MONTANO BAJO TROPICAL (BSMBT)
	BOSQUE HÚMEDO MONTANO BAJO TROPICAL (BHMBT)
	BOSQUE MUY HÚMEDO MONTANO BAJO TROPICAL (BMHMBT)
	DESIERTO PERÁRIDO MONTANO TROPICAL (DPAMT)
	DESIERTO MONTANO TROPICAL (DMT)
	MATORRAL DESÉRTICO MONTANO TROPICAL (MDMT)
	ESTEPA MONTANA TROPICAL (EMT)
	BOSQUE HÚMEDO MONTANO TROPICAL (BHMT)
	BOSQUE MUY HÚMEDO MONTANO TROPICAL (BMHMT)
	DESIERTO ÁRIDO SUBALPINO TROPICAL (DAST)
	DESIERTO SUBALPINO TROPICAL (DST)
	MATORRAL SECO SUBALPINO TROPICAL (MSST)
	BOSQUE HÚMEDO SUBALPINO TROPICAL (BHST)
	BOSQUE MUY HÚMEDO SUBALPINO TROPICAL (BMHST)
	TUNDRA SEMIÁRIDA ALPINA TROPICAL (TSAAT)
	TUNDRA SECA ALPINA TROPICAL (TSAT)
	TUNDRA HÚMEDA ALPINA TROPICAL (THAT)
	TUNDRA MUY HÚMEDA ALPINA TROPICAL (TMHAT)
	TUNDRA PLUVIAL ALPINA TROPICAL (TPAT)
	DESIERTO PERHÚMEDO NIVAL TROPICAL (DPHNT)

Tabla 5. Zonas de vida de Holdridge registradas en Argentina separadas por región latitudinal

ZONAS DE VIDA DE HOLDRIDGE PARA ARGENTINA		
BOSQUE SECO PREMONTANO TROPICAL	MATORRAL DESÉRTICO SUBTROPICAL	MATORRAL DESÉRTICO TEMPLADO CÁLIDO
BOSQUE HÚMEDO PREMONTANO TROPICAL	MONTE ESPINOSO SUBTROPICAL	ESTEPA ESPINOSA TEMPLADA CÁLIDA
DESIERTO MONTANO BAJO TROPICAL	BOSQUE SECO SUBTROPICAL	BOSQUE SECO TEMPLADO CÁLIDO
MATORRAL DESÉRTICO MONTANO BAJO TROPICAL	BOSQUE HÚMEDO SUBTROPICAL	BOSQUE HÚMEDO TEMPLADO CÁLIDO
ESTEPA ESPINOSA MONTANA BAJA TROPICAL	BOSQUE MUY HÚMEDO SUBTROPICAL	DESIERTO MONTANO TEMPLADO CÁLIDO
BOSQUE SECO MONTANO BAJO TROPICAL	DESIERTO SUPERÁRIDO MONTANO BAJO SUBTROPICAL	MATORRAL DESÉRTICO MONTANO TEMPLADO CÁLIDO
BOSQUE HÚMEDO MONTANO BAJO TROPICAL	DESIERTO MONTANO BAJO SUBTROPICAL	ESTEPA MONTANA TEMPLADA CÁLIDA
BOSQUE MUY HÚMEDO MONTANO BAJO TROPICAL	MATORRAL DESÉRTICO MONTANO BAJO SUBTROPICAL	BOSQUE HÚMEDO MONTANO TEMPLADO CÁLIDO
DESIERTO PERÁRIDO MONTANO TROPICAL	ESTEPA ESPINOSA MONTANA BAJA SUBTROPICAL	BOSQUE MUY HÚMEDO MONTANO TEMPLADO CÁLIDO
DESIERTO MONTANO TROPICAL	BOSQUE SECO MONTANO BAJO SUBTROPICAL	MATORRAL SECO SUBALPINO TEMPLADO CÁLIDO
MATORRAL DESÉRTICO MONTANO TROPICAL	BOSQUE HÚMEDO MONTANO BAJO SUBTROPICAL	BOSQUE HÚMEDO SUBALPINO TEMPLADO CÁLIDO
ESTEPA MONTANA TROPICAL	BOSQUE MUY HÚMEDO MONTANO BAJO SUBTROPICAL	BOSQUE MUY HÚMEDO SUBALPINO TEMPLADO CÁLIDO
BOSQUE HÚMEDO MONTANO TROPICAL	DESIERTO MONTANO SUBTROPICAL	BOSQUE PLUVIAL SUBALPINO TEMPLADO CÁLIDO
BOSQUE MUY HÚMEDO MONTANO TROPICAL	MATORRAL DESÉRTICO MONTANO SUBTROPICAL	TUNDRA MUY HÚMEDA ALPINA TEMPLADA CÁLIDA
DESIERTO ÁRIDO SUBALPINO TROPICAL	ESTEPA MONTANA SUBTROPICAL	TUNDRA PLUVIAL ALPINA TEMPLADA CÁLIDA
DESIERTO SUBALPINO TROPICAL	BOSQUE HÚMEDO MONTANO SUBTROPICAL	TUNDRA SEMISATURADA ALPINA TEMPLADA CÁLIDA
MATORRAL SECO SUBALPINO TROPICAL	MATORRAL SECO SUBALPINO SUBTROPICAL	
BOSQUE HÚMEDO SUBALPINO TROPICAL	BOSQUE HÚMEDO SUBALPINO SUBTROPICAL	DESIERTO TEMPLADO FRÍO
BOSQUE MUY HÚMEDO SUBALPINO TROPICAL	BOSQUE MUY HÚMEDO SUBALPINO SUBTROPICAL	MATORRAL DESÉRTICO TEMPLADO FRÍO
TUNDRA SEMIÁRIDA ALPINA TROPICAL	TUNDRA HÚMEDA ALPINA SUBTROPICAL	ESTEPA TEMPLADA FRÍA
TUNDRA SECA ALPINA TROPICAL	TUNDRA MUY HÚMEDA ALPINA SUBTROPICAL	BOSQUE HÚMEDO TEMPLADO FRÍO
TUNDRA HÚMEDA ALPINA TROPICAL	TUNDRA PLUVIAL ALPINA SUBTROPICAL	BOSQUE MUY HÚMEDO TEMPLADO FRÍO
TUNDRA MUY HÚMEDA ALPINA TROPICAL	TUNDRA SEMISATURADA ALPINA SUBTROPICAL	MATORRAL SECO SUBALPINO TEMPLADO FRÍO
TUNDRA PLUVIAL ALPINA TROPICAL	DESIERTO SEMISATURADO NIVAL SUBTROPICAL	BOSQUE HÚMEDO SUBALPINO TEMPLADO FRÍO
DESIERTO PERHÚMEDO NIVAL TROPICAL		BOSQUE MUY HÚMEDO SUBALPINO TEMPLADO FRÍO
		BOSQUE PLUVIAL SUBALPINO TEMPLADO FRÍO
		BOSQUE SEMISATURADO SUBALPINO TEMPLADO FRÍO
		TUNDRA MUY HÚMEDA ALPINA TEMPLADA FRÍA
		TUNDRA PLUVIAL ALPINA TEMPLADA FRÍA
		TUNDRA SEMISATURADA ALPINA TEMPLADA FRÍA
		TUNDRA SUBSATURADA ALPINA TEMPLADA FRÍA
		DESIERTO SUBSATURADO NIVAL TEMPLADO FRÍO
		BOSQUE HÚMEDO ANTIBOREAL
		BOSQUE MUY HUMEDO ANTIBOREAL
		TUNDRA PLUVIAL ALPINA ANTIBOREAL

Tabla 6. Zonas de vida en Argentina, que se hallan fuera de los límites de los hexágonos del modelo de Holdridge, de acuerdo con su distribución en las provincias de humedad.

Provincia de humedad	Zona de vida
Superárido	Desierto Superárido Montano bajo Subtropical (DSAMBS)
Perárido	Desierto Perárido Montano Tropical (DPAMT)
Árido	Desierto Árido Subalpino Tropical (DAST)
Semiárido	Tundra Semiárida Alpina Tropical (TSAAT)
Semisaturado	Desierto Semisaturado Nival Subtropical (DSSNS)
	Tundra Semisaturada Alpina Subtropical (TSSAS)
	Tundra Semisaturada Alpina Templada Cálida (TSSATC)
	Tundra Semisaturada Alpina Templada Fría (TSSATF)
	Bosque Semisaturado Subalpino Templado Frío (BSSSTF)
Subsaturado	Desierto Subsaturado Nival Templado Frío (DSUBSNTF)
	Tundra Subsaturada Alpina Templada Fría (TSUBSATF)

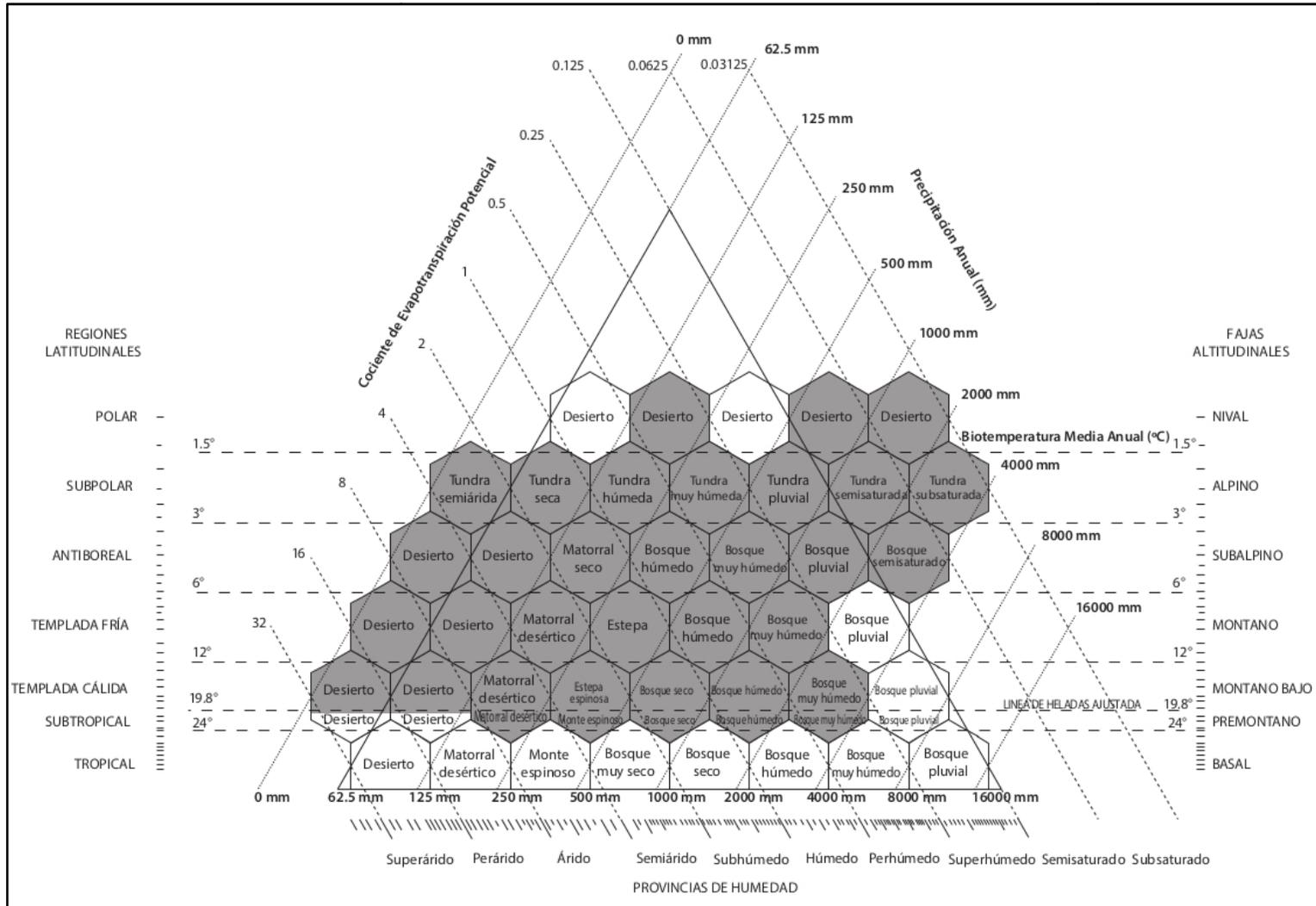


Figura12. Diagrama de Holdridge con las zonas de vida registradas en Argentina (en gris). Modificado de Holdridge (1967).

2.4 Discusión

2.4.1 Las Regiones Latitudinales de Argentina

Resultó evidente que Argentina es un país eminentemente templado cálido y subtropical. El 78 % del territorio nacional se ubicó en esas regiones latitudinales definidas de acuerdo con Holdridge, ocupando total o parcialmente las provincias argentinas desde el Chubut en el Sur, al centro del País, hasta Formosa y Misiones -en especial en la extendida provincia geológica de la Llanura Chaco-pampeana, parte de las Sierras Pampeanas, otras serranías y mesetas, para alcanzar su extremo occidental en la Cordillera Principal y parte de la Cordillera Patagónica Septentrional. La **Región Templada Fría**, que cubrió algo menos del 10% del país, ocupó prácticamente la totalidad de la provincia de Santa Cruz -Meseta Patagónica Sur, Macizo del Deseado, la parte austral de la Meseta Patagónica Norte, la Cordillera Patagónica Austral-, una banda costera atlántica del sur de Chubut -ubicada dentro de la Meseta Patagónica Norte-, y parte de territorios insulares como la mitad N de las islas Malvinas y una pequeña porción del extremo norte de Tierra del Fuego ubicada entre la Bahía de San Sebastián y la boca del Estrecho de Magallanes. La **Región Tropical** ocupó el 11% del territorio argentino, y formó una cuña que se inició ancha en los terrenos elevados de las provincias del NO argentino -ocupando la Puna, Cordillera Central, el NO de las Sierras Subandinas-, sectores pedemontanos de Salta y Formosa, y acabó disponiéndose sobre la cordillera de los Andes y angostándose notoriamente hacia el sur dónde se ubicó sobre las Sierras de Famatina y parte de la Precordillera, Cordillera Frontal y N de la Cordillera Principal. La Región Antiboreal, la más pequeña en extensión, ocupó la mayor parte de la Tierra del Fuego e islas cercanas, y el Sur de las Islas Malvinas.

La aplicación estricta del criterio biotérmico de Holdridge para definir las regiones latitudinales, dejó de lado aspectos tales como la discusión de la baja amplitud térmica mensual y la mayor amplitud día-noche característica del clima Tropical o bien la pertenencia geográfica al espacio entre los Trópicos de Cáncer y Capricornio. En suma, las biotemperaturas son rangos térmicos a los que Holdridge

consideró que las plantas de distintas latitudes están adaptadas. Es de destacar que los valores límites de la biotemperatura (isobiotermas) entre regiones latitudinales no siguen las tendencias de distribución geográfica de las isotermas correspondientes a las temperaturas medias de superficie, al menos en la Argentina. Esta es una observación mencionada por Holdridge (1979), quien además destaca que la relación entre región latitudinal estimada geográficamente y por biotemperatura basal, puede ser muy irregular y depender de varios factores como ser la forma de los continentes, las corrientes marítimas, lagos y ríos, y cadenas montañosas en relación a vientos dominantes. La biotemperatura es el parámetro de calor que el modelo emplea como un factor limitante en la distribución de distintas comunidades, el cual es más significativo que la heliofanía (duración del brillo solar u horas de sol), dado que la distribución de comunidades vegetales presenta mayor relación con el calor que con la posición geográfica por sí misma (Holdridge 1979). Por lo tanto, la estimación de las regiones latitudinales en función de la biotemperatura basal es considerada como la metodología más precisa.

La aplicación de la tasa de cambio térmico vertical de $-6^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (lapserate) indicada por Holdridge para definir las regiones latitudinales en su modelo, se aplica para calcular la temperatura y biotemperatura a nivel de 0 m snm de un punto geográfico a cierta elevación (positiva o negativa respecto de 0 m). El valor de $-6^{\circ}\text{C}/\text{km}$ debe considerarse un valor operativo, ya que el cálculo de esta tasa de cambio depende de la latitud y otros factores como la condición de saturación -o no- de la parcela de aire que asciende adiabáticamente o desciende diabáticamente. Esto puede dar lugar a valores de la tasa que van desde $-10^{\circ}\text{C}/\text{km}$ si la tasa corresponde a una parcela de aire insaturado o "seco" (DALR= dryadiabaticlapserate) que se eleva a partir de una localidad a nivel del mar con una temperatura de 20°C ; o bien si el aire está saturado asciende a una tasa de $-6^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (SALR= saturatedadiabaticlapse rate) (Bureau of Meteorology 1975). Además, la tasa térmica varía con la temperatura y presión del aire, lo que hace extremadamente complejo un cómputo promedio para regiones de relieve pronunciado y heterogéneo. Buitrago (1999) para el NOA, menciona que en zonas de topografía montana muy quebrada como existe en la provincia de Jujuy, un gradiente de $-5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ sería un valor razonable. Si bien la tasa empleada puede considerarse conservadora a la luz de los valores entre DALR y SALR, y tal vez algo

elevada en relación al valor considerado más apropiado por Buitrago (1999), se prefirió aplicar la tasa indicada por Holdridge.

El establecimiento de la línea de heladas que define el límite entre las Regiones templada cálida y subtropical para la Argentina permitió conocer que existe un corrimiento hacia una mayor biotemperatura respecto del límite de la línea de heladas establecido por Holdridge en 18°C. De hecho, con menor nivel de exigencia de frecuencia anual consecutiva, las heladas ocurren prácticamente en todo el país la mayoría de los años (cf. Murphy 2008).

Respecto del uso del término "Boreal" (= "norteño" o "del norte") aplicado a una de las regiones latitudinales, resulta contradictorio utilizarlo en el Hemisferio Sur, ya que las temperaturas descienden hacia el polo sur, y por lo tanto para el mismo rango de biotemperatura se podría aplicar la denominación Austral. Por lo tanto, si bien los nombres originales de las regiones latitudinales según lo definido por Holdridge (1967) se utilizaron en Derguy *et al.* (2019b), en el presente trabajo de tesis, la Región Boreal fue renombrada como "Región Antiboreal" de acuerdo a lo sugerido por Tuhkanen (1992).

En el extremo sur, muy oceánico, se halló la **Región Antiboreal**, limitada a la mayor parte de Tierra del Fuego -con excepción de la zona norte correspondiente a las vecindades de la Bahía de San Sebastián-, la Isla de los Estados y el sur de las Islas Malvinas. Esta región comprende casi el 1% del territorio del país, y está influenciada principalmente por la corriente circumpolar que afecta el clima de las Islas de los Estados y Sur de Islas Malvinas, manteniendo una temperatura constante y fría.

Como se ha descrito, hasta los 40°S la cordillera es más baja y en el territorio continental permite el paso de los vientos del oeste, que tras dejar gran parte de su humedad precipitada en la cordillera, soplan hacia la Patagonia extra-andina y las Malvinas; a ello se suma el efecto sobre la costa atlántica de las corrientes oceánicas frías que se mueven hacia el norte sobre la plataforma. Aún en la cordillera baja, la influencia de vientos cordilleranos de tipo Föhn parecería dar lugar a una zona con biotemperaturas algo mayores al pie de ella, que se reflejó en la presencia de una estrecha faja discontinua cordillerana de la Región Templada Fría en contacto con la Región Templada Cálida en la provincia de Chubut. En la provincia de Santa Cruz, que se ubicó casi en su totalidad en la **Región Templada Fría**, el efecto oceánico

refrigerante en su límite norte se advierte en una diagonal SO-NE que formó la isobioterma de 12°C ingresando nuevamente en Chubut, en forma de una estrecha banda costera de tierras emergidas que alcanzó el norte del Golfo San Jorge.

La **Región Templada Cálida**, que comprende el 45,5% del territorio argentino, resultó en una amplia faja de dirección general SO-NE que ocupó desde la mitad norte de la Patagonia, parte del centro del país, la llanura pampeana, la provincia de Entre Ríos y el E de la provincia de Corrientes. Ese territorio tiene al sur la influencia permanente de los vientos del oeste, en tanto por el norte recibe la influencia de los vientos cálidos procedentes del norte y noreste. A ello hay que agregarle que, como se ha explicado, son frecuentes los frentes fríos del oeste y sudoeste que se mueven en dirección noreste. Esa circulación de superficie resultó coincidente con la dirección del límite norte de la Región Templada Cálida correspondiente a la línea de heladas, que como se ha mencionado corresponde a un valor de biotemperatura de 19,8°C, superior al previsto por Holdridge (1947).

A latitudes menores de 40°S hasta el límite norte del país, los efectos oceánicos se ven atenuados, la elevada cordillera, que dificulta el paso de los vientos del oeste disminuye la influencia del Pacífico, mientras que el efecto del Atlántico decrece por la mayor amplitud longitudinal del territorio sudamericano, quedando restringido al este del país. En consecuencia, aumenta el efecto continental al pie de la cordillera. A su vez, el ordenamiento territorial de estas tres regiones latitudinales (Antiboreal, Templada Fría y Templada Cálida), se debió no solo a la latitud y al relieve, sino también a la manera en que operan en superficie las componentes climáticas que se vinculan a lo largo del año con la presencia de frentes fríos y cálidos y las masas de aire de distinta procedencia geográfica que van detrás de ellos.

Las Regiones Tropical y Subtropical se situaron en latitudes inferiores a los ca. 37°S, en especial sobre el Noroeste; y por ende son los anticiclones del Pacífico y del Atlántico, que coincidentes con las fajas de las altas presiones cercanas a los 30° de latitud sur, emiten los vientos hacia el continente. Se ha destacado que en especial el anticiclón del Pacífico sureste tiene poca incidencia debido a la gran altura de la cordillera cuyos pasos están por encima de los 4000 m snm, lo que constituye un impedimento para la mayoría de los procesos atmosféricos de importancia climática que se desarrollan por debajo de esas altitudes. La **Región Tropical** en Argentina

coincidió en gran medida con los sistemas de altas montañas cordilleranos y de la Puna, con afinidades biogeográficas y geológicas con el Altiplano de Bolivia y Perú, que es vecina a la zona de la baja térmica denominada "lengua de calor" (determinada por la isoterma de 48°C de temperatura máxima absoluta) que se extiende por la llanura chaqueña desde los Llanos de La Rioja hasta el Chaco Salteño (Bianchi *et al.* 2005). Pero la Región Tropical, además de extenderse como una cuña sobre las altas montañas y el altiplano puneño, y continuar en forma de mosaicos hasta el norte de la Provincia de Mendoza, también se extiende sobre terrenos quebrados y faldeos del NE de Salta, y NO de Chaco y Formosa; coincidiendo con la distribución de masas de aire cálido provenientes de las zonas tropicales amazónicas a través de los sistemas integrados de BCH, DNOA y AB. Una faja discontinua de la Región Subtropical se ubica desde el límite sur de la Provincia de Tarija, (Bolivia), y ocupa valles cordilleranos de Salta y hacia el sur en Jujuy, entre aproximadamente Santa Victoria al NO en Salta, Calilegua y San Pedro en Jujuy; interponiéndose entre las dos zonas descriptas de la Región Tropical. Este ingreso coincide con el desarrollo de diferentes tipos de vegetación que se desarrollan en un mayor gradiente de precipitación que en sus alrededores tropicales más secos (Murphy 2008). Dentro de esa faja, los lugares con una mayor precipitación posibilitan que el calor radiativo sea transferido al proceso de evapotranspiración y por lo tanto, que la temperatura de la región disminuya (Burgos y Vidal 1951). Este fenómeno parece también contribuir al desplazamiento hacia el norte de las biotemperaturas en el este de la llanura chaco-pampeana, puesta en evidencia por la dirección de la línea de heladas, como plantea Burgos (1968) para el noreste bonaerense. Respecto de la ausencia de Faja Basal en la Región Tropical, es de destacar que no implica la ausencia de tierras a baja elevación en esta región, ya que el límite superior de BMA de la Faja Premontana -definido en 24°C- equivale a áreas de baja elevación, desde prácticamente el nivel del mar hasta unos 1000 msnm; esto se observó en la zona pedemontana y llana del Este y NE de la Región Tropical (Figura 9).

La **Región Subtropical**, que comprende el 33% del territorio argentino, resulta influenciada por vientos cálidos del norte, que se encuentran con los vientos de masas frías que penetran desde el Pacífico atravesando la baja cordillera de los Andes al sur de los 40° S de latitud (Eidt 1969). Estos últimos vientos se mueven en dirección NE y pueden en ocasiones hasta provocar nevadas en la meseta de Misiones. Ese flujo de

aire frío que sopla hacia el NE pujando periódicamente a las masas cálidas explicaría por qué la línea de heladas y el límite con la región Tropical presentó una orientación de SO a NE (Figura 11). En la zona árida de la Región Subtropical que ocupó desde el oriente de la cuña tropical hasta el oeste de las montañas pampeanas, se ubica la DNOA que como se ha destacado, cumple un papel significativo en el clima de Argentina, atrayendo masas de aire en verano, la estación de lluvias. Esta zona de la Región Subtropical contrasta con su extremo isohigro (precipitaciones distribuidas uniformemente a lo largo del año) –si bien con una cierta mayor concentración de lluvias en verano- ubicado en la provincia de Misiones.

En síntesis, la gran extensión latitudinal de Argentina explica el amplio rango de biotemperaturas y la existencia de 5 regiones latitudinales. Al mismo tiempo, el conjunto de los sistemas climáticos descriptos permite comprender el patrón en diagonal de las regiones latitudinales, cuyos límites indicados por isolíneas biotérmicas interceptan los paralelos geográficos formando con ellos un ángulo agudo abierto al norte, cada vez más pronunciado hacia el lado Tropical (Figura 11).

Por otra parte, el reconocimiento de un valor particular para la línea de heladas en Argentina resultó decisivo, porque su estimación bajo una definición precisa como la de Lugo *et al.* (1999) hizo evidente que el Subtrópico puede, en ciertas ocasiones, estar afectado por heladas. En el caso de Argentina, y otras partes del cono sur sudamericano, se verifican heladas por el ingreso esporádico de masas de aire polar de los frentes fríos intensos que mucho más esporádicamente logran alcanzar incluso latitudes muy bajas en Amazonia. En este sentido, cambios en los criterios usados para establecer la línea de heladas pueden dar lugar a cambios notorios de la superficie considerada parte de la Región Subtropical.

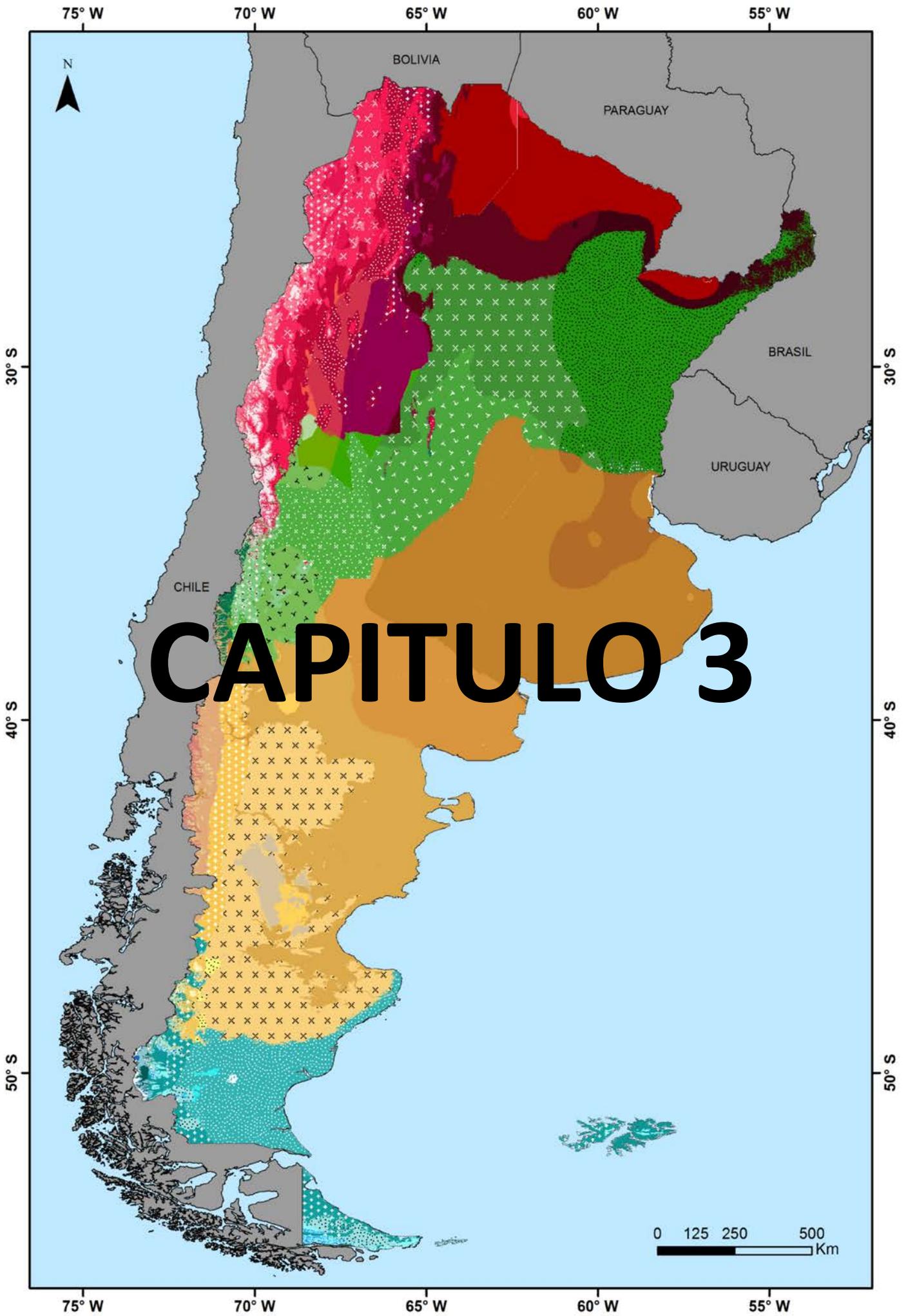
2.4.2 Las zonas de vida en la Argentina

El diagrama de Holdridge (1979) considerado en tres dimensiones, define 120 zonas de vida diferentes. Sin embargo, en el mundo están localmente presentes otros grupos de combinaciones de condiciones climáticas que no están representadas en el diagrama; hecho que indica la existencia de otras zonas de vida que, en cuanto al diagrama, representan extensiones del mismo (ver Holdridge 1979, página 10). De tal forma, la incorporación de las 11 nuevas zonas de vida registradas en Argentina,

aumentó el número total de ellas a 131. En Argentina se identificaron 83 zonas de vida, posibles de cartografiar a la escala del mapa. Estas representan el 63 % del total de 131 zonas de vida, o 69% de las 120 zonas de vida reconocidas por Holdridge en su diagrama original.

En Argentina esta alta heterogeneidad bioclimática está asociada a las diferentes combinaciones de la alta variabilidad de biotemperaturas, precipitación anual y cociente de EVP/P resultantes de la ubicación geográfica (latitudinal), topografía (desde el nivel del mar a la montaña más alta de América) y las corrientes oceánicas operando sobre los componentes climáticos. Las zonas de vida presentaron un tamaño y arreglo especial de los polígonos individuales que las representaron, que cambió con la ubicación en las tierras montañosas o planicies. En el NOA, sobre los Andes y la Puna predominan los polígonos pequeños, mostrando arreglos espaciales que expresan los gradientes de temperatura y baja precipitación en un ambiente topográfico rugoso. Las planicies al este de las altas montañas se caracterizan por zonas de vida constituidas por grandes polígonos con unos pocos sistemas montañosos de mayor altitud relativa en cada región que muestran una zona de vida diferente a aquella presente en las planicies circundantes.

Este estudio confirmó que Argentina presenta una gran diversidad de zonas de vida y por ende una gran heterogeneidad bioclimática. Esto se relaciona con: (i) su posición geográfica en el cono sur de América y su gran extensión latitudinal; (ii) la cordillera de los Andes al Oeste que interviene en la expresión biotérmica y la distribución de las precipitaciones y de masas de aire de características diferentes; (iii) el dominio de planicies al este de los sistemas montanos más importantes; (iv) la acción de diferentes centros semipermanentes continentales y marinos de alta y baja presión que determinan una circulación atmosférica diferente al norte y sur de los 40°S; (v) el desarrollo de condiciones atmosféricas particulares que intervienen en la expresión estacional de los climas; y (vi) la influencia de corrientes oceánicas.



CAPITULO 3. EFECTO DE LA INCERTIDUMBRE DE LOS MODELOS CLIMÁTICOS SOBRE LA CLASIFICACIÓN ECOLÓGICA DE LA TIERRA

3.1 Introducción

Los datos climáticos grillados de alta resolución son fuente de información esencial para el desarrollo de estudios ecológicos (Abatzoglou 2013, Belda *et al.* 2014). Entre otras aplicaciones se utilizan para evaluar el impacto del cambio climático en la potencialidad de uso de la tierra (Zak *et al.* 2008, Yan *et al.* 2017), para modelar distribuciones de especies (Peterson y Nakazawa 2008, Pliscoff *et al.* 2014, Nori *et al.* 2016), y para evaluaciones de conservación de la biodiversidad (Araújo y Rahbek 2006, Bellard *et al.* 2012, Schirone *et al.* 2016). Esta información deriva principalmente de datos meteorológicos, incluidos los registrados por estaciones *in situ* y aquellos obtenidos remotamente, y requiere un procesamiento considerable para crear modelos coherentes espacial y temporalmente. Existen incertidumbres importantes en estos modelos climáticos, que pueden surgir del proceso de interpolación o del sesgo en los datos observados, entre otros (Baker *et al.* 2017). A pesar de su amplia difusión, el efecto de la incertidumbre de los datos climáticos grillados en las investigaciones ecológicas, rara vez es considerado (Fick y Hijmans 2017).

Los datos climáticos grillados se producen en general a dos escalas, datos a escala local (es decir, desarrollados para una región geográfica o país en particular; Haylock *et al.* 2008, Jones *et al.* 2009, Bianchi y Cravero 2010), o datos a escala global, como los modelos ampliamente utilizados de WorldClim (*e.g.* New *et al.* 2002, Hijmans *et al.* 2005, Fick y Hijmans 2017). Estos derivan de observaciones climáticas *in situ* y obtenidas por detección remota, y actualmente están disponibles en una resolución espacial alta (≤ 1 km), que es ideal para capturar variaciones ambientales detalladas en los paisajes (Hijmans *et al.* 2005). Si bien los estudios ecológicos para una región o país específicos generalmente usan datos climáticos desarrollados para esa área en particular (es decir, modelos climáticos locales, MCL), extrapolar los resultados a otras regiones o pronosticar cambios en escenarios futuros requiere el uso de modelos climáticos globales (MCG). Además, comprender las diferencias entre los conjuntos de datos climáticos locales y globales es particularmente importante frente al cambio

climático, ya que los datos climáticos disponibles para escenarios futuros son generalmente globales (Tapiador *et al.* 2019). El avance en el uso de datos climáticos en estudios ecológicos requiere una comprensión clara de las incertidumbres de los modelos climáticos locales versus los globales.

El sistema de zonas de vida de Holdridge (Holdridge 1967) representa una herramienta valiosa para evaluar las incertidumbres de los datos climáticos grillados locales y globales (Metzger *et al.* 2013, Derguy *et al.* 2019b), ya que permite generar una clasificación ecológica de la tierra basada en variables climáticas simples (temperatura y precipitación). Al aplicar Holdridge con modelos climáticos locales (por ejemplo, a nivel de país), es importante evaluar cómo las incertidumbres de estos datos afectan la clasificación ecológica de la tierra, es decir, la distribución de las zonas de vida; y para cuantificar esas incertidumbres los datos climáticos derivados de estaciones meteorológicas resultan de suma utilidad (Behnke *et al.* 2016). Por otro lado, si se aplican modelos climáticos globales, es importante evaluar las diferencias entre la clasificación de la tierra derivada de los datos climáticos globales y aquella derivada de los datos locales, incluyendo tanto la magnitud como la variación espacial de esas diferencias. Idealmente, las diferencias entre los dos mapas de clasificación de la tierra deberían ser estadísticamente pequeñas en todo el paisaje, es decir, dentro del rango de incertidumbre de los datos climáticos locales.

Al mismo tiempo, la comparación entre dos mapas puede verse afectada por la resolución espacial, como en el caso del "problema de unidad de área modificable" (MAUP por sus siglas en inglés; Openshaw 1984). Este problema puede investigarse agrupando los píxeles en una resolución espacial más pequeña (es decir, tamaños de píxeles más grandes; Stillwell *et al.* 2018). A su vez, se puede utilizar una tendencia en el acuerdo -asignación de una misma categoría a los mismos píxeles en distintos mapas- de mapas aplicando un rango de tamaño de píxeles para encontrar la resolución espacial adecuada en la comparación de mapas. Cuando los mapas categóricos se comparan según un acuerdo de píxel a píxel, una diferencia en la etiqueta de la categoría se considera un error incluso si la categoría correcta se encuentra en un píxel vecino, o si cae en los márgenes de diferentes categorías pero es ambientalmente similar (Power *et al.* 2001, Pontius y Suedmeyer 2004). De esta

manera, la resolución espacial resulta un problema complejo en el modelado del clima y sus aplicaciones (Benhke *et al.* 2016, Bedia *et al.* 2013, Karger *et al.* 2017).

Las estimaciones de las métricas de composición y configuración del paisaje también pueden verse afectadas por los cambios en la resolución temática (ambiental), que también se considera una forma de "MAUP" (Buyantuyev y Wu 2007). Al igual que el problema de la resolución espacial, el problema de la resolución temática puede investigarse combinando las clases temáticas en menor cantidad de clases y que sean más amplias. Además, los datos climáticos grillados involucran modelos de interpolación espacial, que generalmente son menos confiables en paisajes ambientalmente complejos que en paisajes homogéneos (Yao *et al.* 2013). Por lo tanto, se espera que los desajustes entre los datos grillados locales y globales sean más frecuentes en áreas geográficas con mayor heterogeneidad topográfica que en áreas de llanura. Aunque los efectos de la topografía y la resolución ambiental afectan notablemente los resultados derivados de estudios ecológicos basados en modelos climáticos, aún hay poca información al respecto y no suelen considerarse en los análisis.

El objetivo principal de este capítulo fue evaluar el efecto de la incertidumbre de los modelos climáticos locales en la clasificación ecológica de la tierra, y compararlo con los mapas ecológicos derivados de modelos climáticos globales. Para lograrlo, los objetivos específicos propuestos fueron: (1) Cuantificar el efecto de la incertidumbre de los modelos climáticos locales en las zonas de vida de Holdridge en Argentina; (2) Evaluar el acuerdo entre los mapas de zonas de vida de Holdridge obtenidos con datos grillados locales y globales; (3) Evaluar el efecto de la resolución espacial y ambiental en el acuerdo entre los mapas de zonas de vida de Holdridge obtenidos con datos grillados locales y globales; y (4) Evaluar en qué medida la diferencia en el acuerdo entre mapas está relacionada con la heterogeneidad climática y/o topográfica.

Las hipótesis de trabajo fueron:

1) El acuerdo entre mapas de zonas de vida calculados con modelos locales y con modelos globales se encuentra en el rango de valores observados entre los mapas calculados con datos locales y datos locales alterados, y resulta afectado de la misma manera por la complejidad topográfica y climática.

2) El acuerdo entre mapas de zonas de vida calculados con datos locales y con datos globales aumenta al disminuir la resolución espacial y temática debido a que en las comparaciones pixel a pixel de mapas categóricos, las discrepancias disminuyen al agrupar píxeles o categorías.

3.2 Materiales y métodos

3.2.1 Zonas de vida de Holdridge

Para el propósito de este capítulo y los subsiguientes, definimos las zonas de vida de Holdridge en función de la biotemperatura media anual (BT) y la precipitación total anual media (PP). Para analizar niveles de zonificación más amplios nos centramos en las regiones latitudinales. La relación de evapotranspiración potencial se deriva de la temperatura y la precipitación ($EVP = (BT * 58.93) / PP$) y define las provincias de humedad, así como las zonas ecotonales o de transición entre las zonas de vida, que pueden resolverse al asignarlas a la zona de vida más cercana aplicando una clasificación difusa o dura (Lugo *et al.* 1999, Derguy *et al.* 2019b). Tal procedimiento habría complicado la implementación del método de aleatorización llevado a cabo aquí para simular el efecto de la incertidumbre en los datos climáticos locales sobre la clasificación ecológica de la tierra (explicado en los métodos). Se analizaron las diferencias entre los mapas obtenidos con y sin considerar EVP (datos no presentados), y se encontró que la mayoría de las diferencias se explicaron por la confusión de zonas de vida ecológicamente muy similares, ya que todas estaban por debajo de la temperatura media anual de 1.5 ° C. Por otra parte, ignorando tal confusión, el porcentaje de acuerdo entre los mapas supera el 95%. Por lo tanto, en adelante en este trabajo de tesis, los mapas de las zonas de vida de Holdridge se generaron usando solo la biotemperatura media anual y la precipitación total anual acumulada.

3.2.2 Datos climáticos

Se usaron datos grillados de temperatura y precipitación de dos fuentes, un modelo local (a nivel nacional) y un modelo global. Para los datos climáticos locales se utilizó el Atlas Climático Digital de Argentina (INTA, Bianchi y Cravero 2010) en una

resolución espacial de 1 km. Para los datos climáticos globales se utilizó WorldClim, que proporciona información climática a escala global con una resolución espacial de 1 km (Fick y Hijmans 2017). Además, se emplearon datos de temperatura media anual y precipitación total anual media de 80 estaciones meteorológicas pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional (SMN) distribuidas en todo el país para el período 1981-2010.

Aunque tanto el MCL como el MCG se desarrollaron a partir de datos de origen similares, incluidas observaciones *in situ* y de detección remota, derivan de un proceso de interpolación espacial que aplica diferentes procedimientos. Los MCL se generaron a partir de observaciones locales históricas realizadas en diferentes períodos de tiempo entre 1921 y 2000. Dichos datos se interpolaron utilizando modelos espaciales y topográficos y se corrigieron de acuerdo a la opinión de expertos locales (Bianchi y Cravero 2010). Los MCG, por otra parte, derivaron de una gran cantidad de datos climáticos promedio mensuales de estaciones meteorológicas de fuentes mundiales, regionales, nacionales y locales, principalmente para los períodos 1970-2000. Estos datos se interpolaron utilizando el algoritmo de *thin-plate smoothing spline* implementado en ANUSPLIN y datos derivados de satélites y otras covariables - cobertura media mensual de nubes, temperatura máxima y mínima de la superficie terrestre- (Fick y Hijmans 2017).

Puesto que los períodos de tiempo de las diferentes fuentes de datos climáticos (MCL, MCG y estaciones meteorológicas del SMN) se superponen, asumimos que las diferencias entre los datos grillados locales y globales resultan de los diferentes métodos de interpolación aplicados, de la variabilidad climática y del efecto de la incertidumbre de los datos climáticos.

3.2.3 Análisis de los datos

Incertidumbre asociada a los datos grillados locales (MCL)

Para evaluar el efecto de la incertidumbre en el MCL usando la clasificación de Holdridge, realizamos una serie de pasos. Primero, calculamos la diferencia absoluta en la temperatura media anual y la precipitación total anual entre el MCL y las 80 estaciones meteorológicas del SMN. Además, definimos el rango de diferencias

observadas entre el MCL y las estaciones meteorológicas como -D90 a D90, donde D90 era el percentil 90 de las diferencias, evitando así la influencia de eventuales datos atípicos. El rango de las diferencias se calculó por separado para los datos entre 0-300 mm y > 300 mm de precipitación total anual, ya que las diferencias fueron claramente mayores para valores mayores de precipitación. No fue necesario establecer una separación similar para los valores de temperatura media anual. Luego, se modificó cada valor en el MCL por un valor aleatorio tomado del rango de diferencias observadas, lo que resultó en un MCL "alterado" (en adelante MCLa). Posteriormente, medimos el porcentaje de concordancia en las zonas de vida de Holdridge calculadas a partir del MCL original y el MCLa. Esta medida se iteró 1000 veces para calcular el porcentaje de acuerdo promedio, así como los percentiles 5 y 95, que se tomaron como límites de confianza del 90% para el porcentaje de acuerdo. Estos límites de confianza se usaron como una medida de la variabilidad (es decir, incertidumbre) en las zonas de vida de Holdridge calculadas a partir del MCL debida a la variabilidad de dichos datos climáticos. El porcentaje de acuerdo se tomó como una medida simple de concordancia entre mapas basada en una comparación pixel a pixel. Los análisis se realizaron en R (R *Development Core Team* 2007). En los resultados, y con el fin de evaluar las variaciones geográficas de esta medida, se presentó el acuerdo entre el MCL y el MCLa para todo el país y por regiones latitudinales.

El acuerdo MCL-MCG comparado con la incertidumbre del MCL

El mapa de zonas de vida derivado del MCL se comparó con un nuevo mapa de zonas de vida obtenido a partir del MCG, y se calculó el porcentaje de acuerdo entre ambos a nivel de todo el país y por región latitudinal. Luego, se evaluó si el porcentaje de acuerdo entre modelos estaba contenido dentro de los intervalos de confianza estimados para el porcentaje de acuerdo entre el MCL y el MCLa. Si el porcentaje de acuerdo entre los mapas MCL y MCG estaba contenido dentro de la incertidumbre del mapa MCL, entonces la diferencia entre ambos (MCL-MCG) no resultaría estadísticamente significativa. Por el contrario, si el porcentaje de acuerdo entre los mapas MCL y MCG cae por fuera de los límites de confianza del mapa MCL, entonces la diferencia entre los dos mapas (MCL-MCG) se considera estadísticamente significativa.

Variabilidad espacial y ambiental del acuerdo MCL-MCG

Para evaluar el efecto de la resolución espacial y ambiental en el acuerdo entre la clasificación de zonas de vida de Holdridge basada en MCL y MCG, se aplicó el análisis de resolución múltiple de Pontius *et al.* (2004). Se utilizó el módulo VALIDATE del *software* IDRISI (Eastman 2012) para calcular el acuerdo entre los dos mapas en una serie de resoluciones espaciales, que variaron desde 1 km hasta 1000 km. Las menores resoluciones espaciales se crearon agregando píxeles vecinos para obtener una celda cada vez más amplia (Pontius 2000, Pontius *et al.* 2004). La clase más frecuente entre los píxeles agregados se asignó como atributo al nuevo píxel más amplio. Las comparaciones se realizaron a nivel de todo el país y por regiones latitudinales, para cada resolución espacial. En particular, se usaron tres variables para comparar los modelos (Pontius *et al.* 2004): 1) Porcentaje de Acuerdo Total: proporción de celdas o píxeles correctamente clasificados, es la medida de acuerdo más utilizada entre mapas (o simplemente, Porcentaje de Acuerdo); 2) Acuerdo por Azar: acuerdo que podría lograrse sin información adicional de ubicación y cantidad, donde la probabilidad de acuerdo en cada categoría entre dos mapas (uno de referencia y otro a validar) es de $1/J$, siendo J el número de categorías; y 3) Precisión de Celda: es la precisión con que una celda es clasificada correctamente en cada categoría, se calcula como la diferencia entre el Porcentaje de Acuerdo Total y el acuerdo entre el mapa de referencia (MCL) y un mapa comparativo modificado (MCG) donde sus celdas son relocalizadas aleatoriamente (Pontius 2000, Pontius *et al.* 2004).

Para evaluar el efecto de la resolución temática, combinamos los rangos logarítmicos contiguos de biotemperatura y precipitación del diagrama de zonas de vida en las siguientes categorías: $<1.5^{\circ}\text{C}$ a 3°C , 3°C a 12°C , y 12°C a 30°C para biotemperatura, y los rangos de 0 mm a 125 mm, 125 mm a 500 mm, 500 mm a 2000 mm y 2000 mm a 8000 mm para precipitación. De esta manera, se agrupan cuatro zonas de vida en una nueva categoría (fig.13). Dado que usamos los rangos de biotemperatura y precipitación definidos por el sistema de Holdridge para dar nuevos límites a las zonas de vida, esperamos que todas estas categorías exhiban una

heterogeneidad ambiental similar. Mediante este procedimiento, el número de zonas de vida se redujo a aproximadamente una cuarta parte del número original.

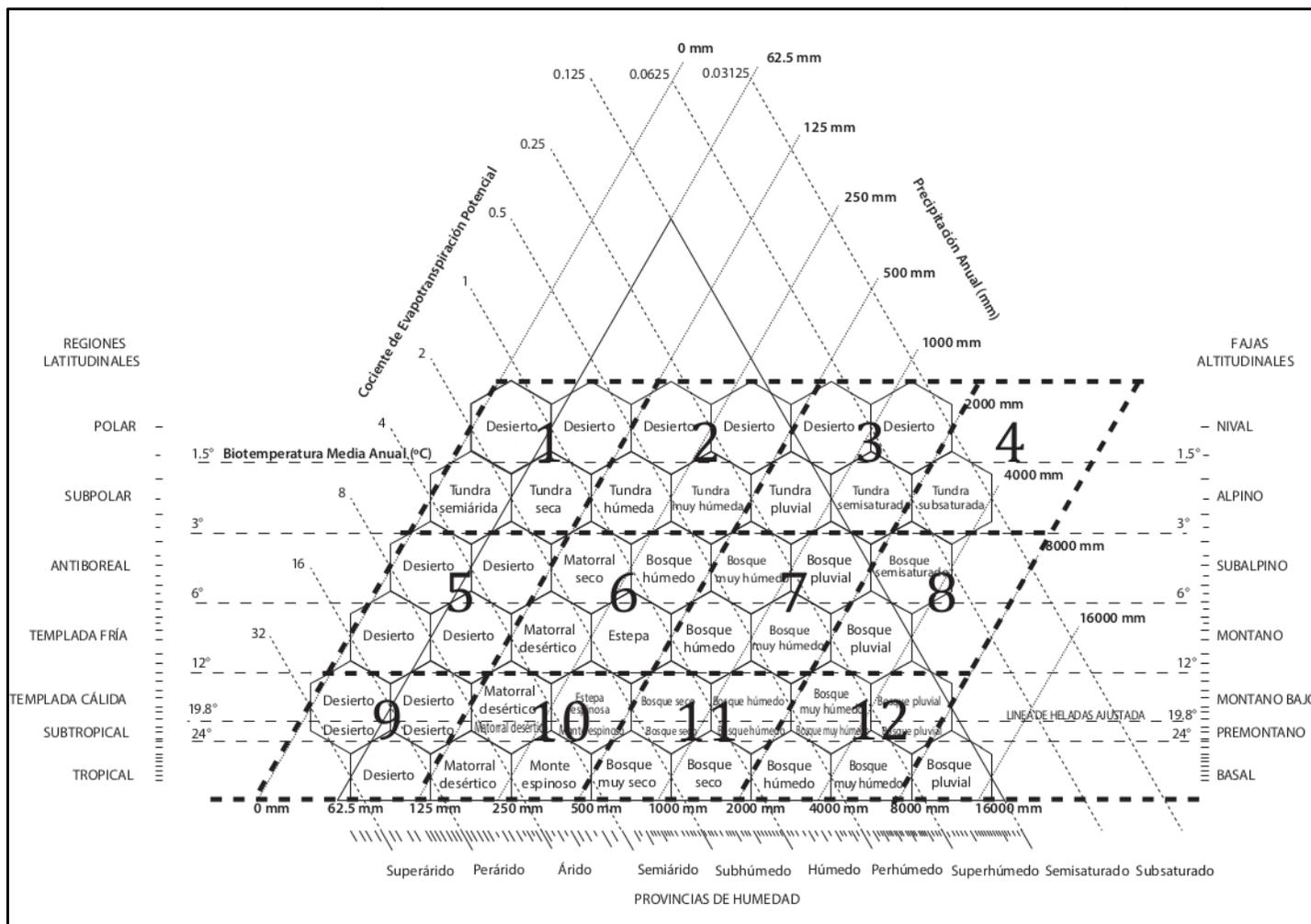


Figura 13. Agrupamientos de zonas de vida para reducir la resolución ambiental. Las líneas punteadas más gruesas delimitan los 12 grupos de zonas bioclimáticamente similares. Modificado de Derguy *et al.* 2019b.

Efecto de la heterogeneidad climática y topográfica sobre el acuerdo MCL-MCG

Se analizaron las variaciones en el porcentaje de acuerdo MCL-MCG entre regiones latitudinales con el objetivo de evaluar si las diferencias climáticas del territorio afectaron estos resultados. Para esto se calculó la correlación entre el porcentaje de acuerdo y un índice de variabilidad climática dado por la relación entre el número de zonas de vida presentes en una región latitudinal y el área total de la región (ZV / AREA), usando el coeficiente de correlación de Spearman. Por otra parte se calculó un índice de complejidad topográfica (Ht) para cada región latitudinal, utilizando el índice de diversidad de Shannon-Wiener (Shannon y Weaver 1963). Para esto, se categorizó un modelo de elevación digital en intervalos de 500 m, y se calculó 'pi' como la relación entre el área del territorio contenida en cada intervalo altitudinal y el área total de la región latitudinal de pertenencia. Luego se calculó la correlación entre el porcentaje de acuerdo por región latitudinal y Ht. Finalmente, para evaluar si el tamaño de las regiones latitudinales influyó en el porcentaje de acuerdo MCL-MCG se calculó la correlación entre el porcentaje de acuerdo y el área total de cada región latitudinal.

3.3 Resultados

3.3.1. Incertidumbre asociada a los datos grillados locales

El acuerdo medio entre el MCL y el MCLa a nivel de todo el país, obtenido a partir de 1000 simulaciones, fue de aproximadamente 75% y varió ligeramente (entre 62-82%) por regiones latitudinales. Sin embargo, hubo variaciones importantes en la amplitud de los intervalos de confianza, resultando las mayores amplitudes en las regiones antiboreal (32% a 93%) y tropical (40% a 87%), y la menor amplitud en la región subtropical (68% a 93%; Fig.14).

3.3.2. Acuerdo MCL-MCG comparado con la incertidumbre del MCL

A nivel de país, el acuerdo promedio entre los mapas de zonas de vida derivados del MCL y el MCG fue del 70%, pero este valor varió sustancialmente entre las regiones (40-83%). Sin embargo, el porcentaje de acuerdo MCL-MCG se encontró

dentro del intervalo de confianza de la incertidumbre del MCL, tanto a nivel de país como por regiones latitudinales (ver Fig.14). A su vez, dentro de los límites de los intervalos de confianza, los valores de acuerdo MCL-MCG tienden a ser más bajos que los acuerdos MCL-MCLa. En las regiones antiboreal y tropical, por ejemplo, el acuerdo MCL-MCG estuvo cerca del límite de confianza inferior del acuerdo MCL-MCLa (Fig. 14).

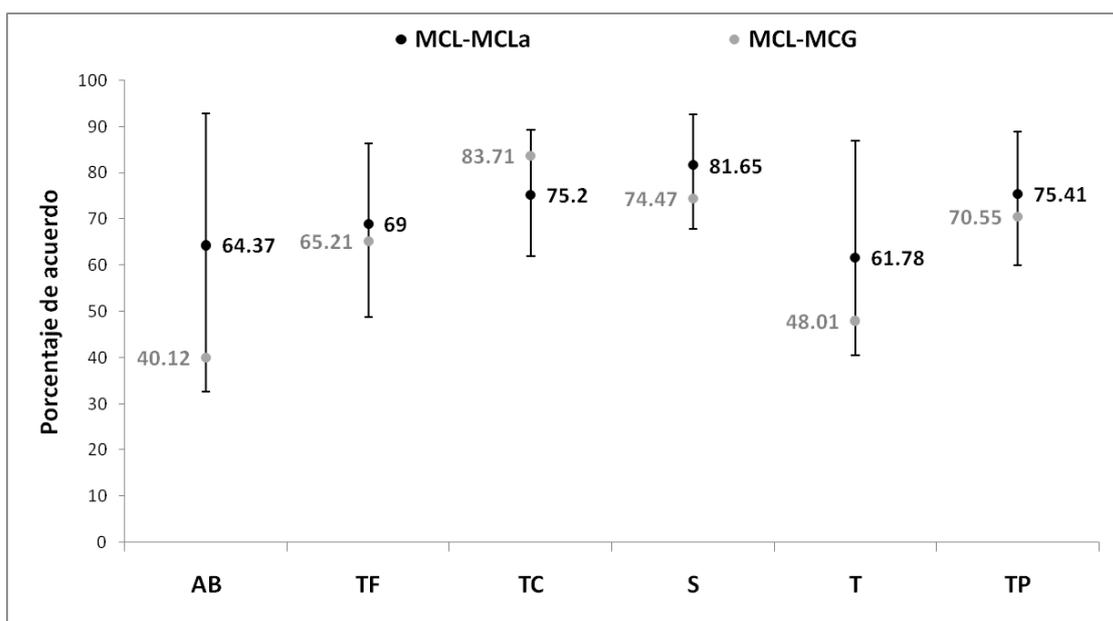


Figura 14. Comparaciones entre el acuerdo MCL-MCG y el acuerdo MCL-MCLa y sus intervalos de confianza, para todo el país (TP) y para las regiones latitudinales: Antiboreal (AB), Templada fría (TF), Templada cálida (TC), Subtropical (S) y Tropical (T).

3.3.3. Efecto de la resolución espacial y ambiental sobre el acuerdo MCL-MCG

Las variables usadas para medir el acuerdo entre los mapas de zonas de vida basados en MCL y MCG a nivel de todo el país tendieron a permanecer constantes para tamaños de píxeles que oscilaron entre 1 km y 50 km. Sin embargo, a una menor resolución (50 km a 1000 km), la Precisión de Celda tendió a disminuir, mientras que el Porcentaje de Acuerdo Total y el Acuerdo por Azar tendieron a aumentar (Fig. 15). La misma tendencia se encontró al reducir la resolución temática (es decir, para el mapa de zonas de vida con menos clases; Fig. 15)

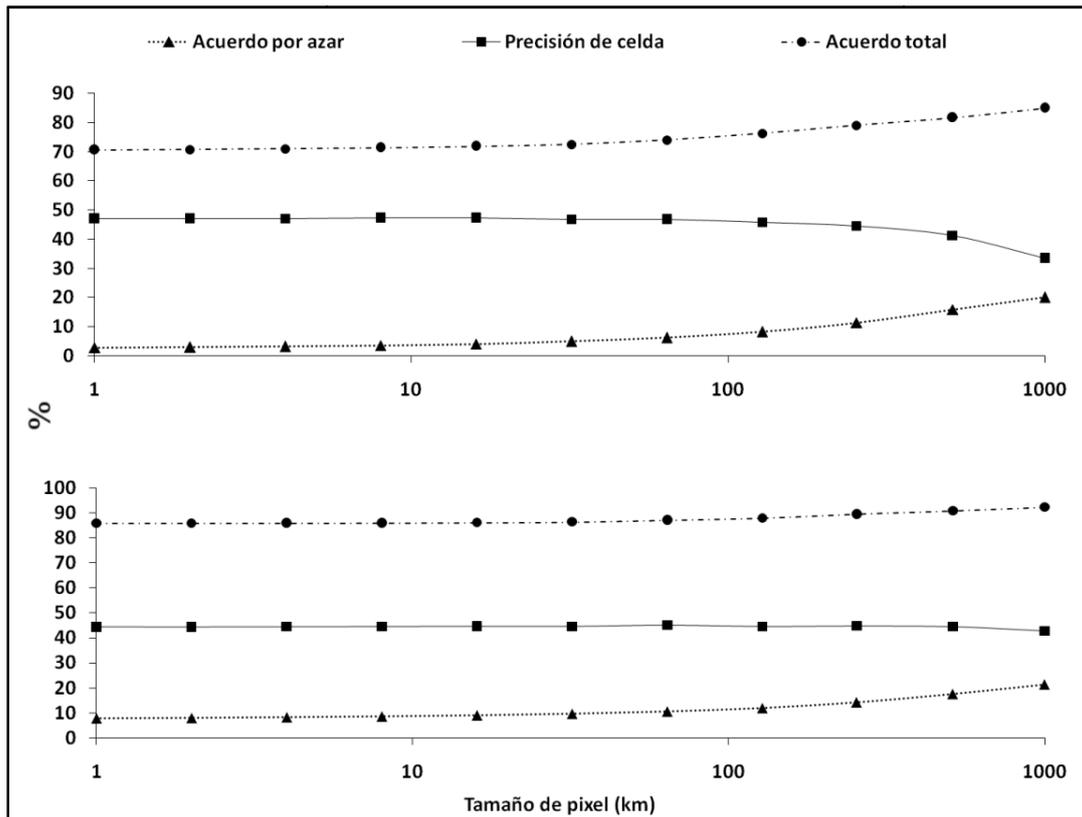


Figura 15. Porcentaje de Acuerdo Total, Precisión de Celda, y Acuerdo por Azar en diferentes tamaños de píxeles para todo el país y expresados en la resolución ambiental original (a) y la resolución ambiental reducida (b).

A nivel de las regiones latitudinales, se observaron patrones similares. La disminución de la Precisión de Celda se registró a partir de un tamaño de 100 km de píxel con una resolución espacial decreciente, excepto en la región antiboreal, en la cual este acuerdo disminuyó a partir de un tamaño de píxel de 10 km.

En el análisis de la resolución temática por regiones latitudinales, el Porcentaje de Acuerdo Total y el Acuerdo por Azar aumentaron cuando se agruparon las zonas de vida (Fig. 16), mientras que la Precisión de Celda mostró una tendencia diferente, y solo aumentó en las regiones tropical y antiboreal (Fig. 16).

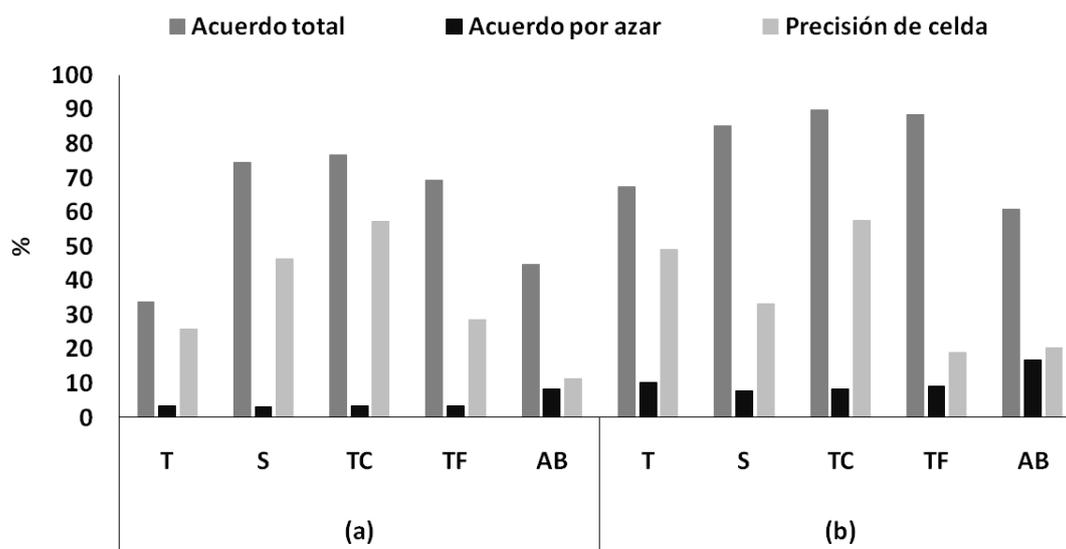


Figura 16. Porcentaje de Acuerdo Total, Precisión de Celda y Acuerdo por Azar por regiones latitudinales según la resolución ambiental original (a) y reducida (b) (T = Tropical, S = Subtropical, TC = Templada cálida, TF = Templada fría y AB = Antiboreal).

3.3.4. Acuerdo MCL-MCG y heterogeneidad climática y topográfica

El porcentaje de acuerdo MCL-MCG aumentó con el área (km²) de las regiones latitudinales ($r = 0.9$, $P < 0.05$, Fig. 17), y disminuyó con el aumento de la relación ZV/AREA (es decir, con la medida de variabilidad climática; $r = -0.9$, $P < 0.05$, Fig. 17). Sin embargo, no hubo relación entre el acuerdo MCL-MCG y la complejidad topográfica ($r = 0.1$, $P > 0.9$). Por ejemplo, las dos regiones con menor acuerdo MCL-MCG exhibieron la complejidad topográfica más baja (antiboreal) y más alta (tropical) (Fig. 17).

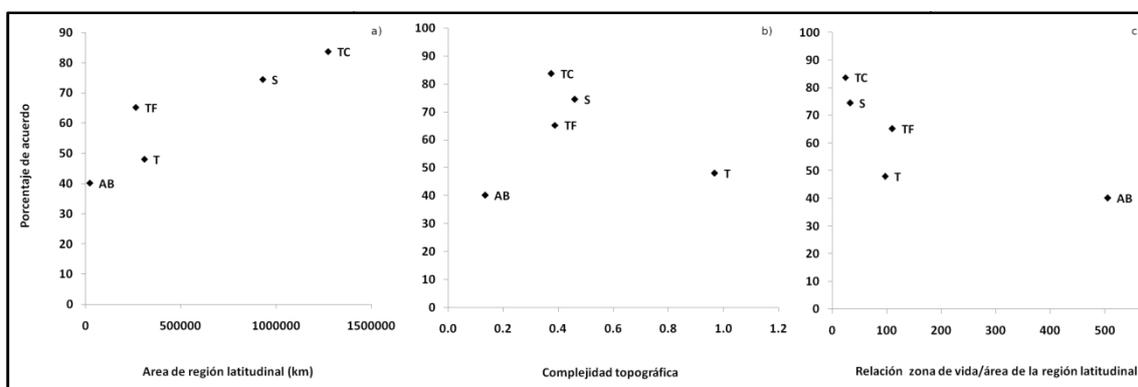


Figura 17. Porcentaje de acuerdo por regiones latitudinales en función del área de la región latitudinal (km²) (a); Complejidad topográfica (b) Zonas de vida / área de región

latitudinal (c) (T = Tropical, S = Subtropical, TC = Templada cálida, TF = Templada fría y AB = Antiboreal).

3.4. Discusión

La incertidumbre del MCL puede tener efectos importantes en la clasificación ecológica de zonas de vida, aunque este efecto depende en gran medida de la heterogeneidad ambiental y climática. A nivel de todo el país, el acuerdo promedio entre el MCL y el MCLa fue de alrededor del 75%, pero en algunas regiones el efecto de la incertidumbre sobre este acuerdo fue mayor, como en las regiones tropical y antiboreal, donde casi el 40% de la región podría clasificarse con incertidumbre usando el MCL. Aunque la temperatura media anual y la precipitación total anual acumulada del MCL se correlacionaron bien con las estaciones meteorológicas del SMN (precipitación $r = 0,9898$, $p < 0,0001$ y temperatura $r = 0,9458$, $p < 0,0001$), las diferencias entre ellos pueden ser lo suficientemente grandes como para causar un efecto apreciable en el porcentaje de acuerdo.

Por otro lado, las diferencias entre los mapas de zonas de vida basados en el MCL y el MCG fueron similares a las diferencias asociadas a la incertidumbre de los datos locales. Aunque tales diferencias variaron apreciablemente entre las regiones latitudinales. El acuerdo MCL-MCG, a nivel de todo el país, fue similar al porcentaje de acuerdo promedio observado en la comparación MCL-MCLa. Además, el acuerdo de porcentaje MCL-MCG por región latitudinal también fue similar al acuerdo de porcentaje MCL-MCLa, lo que sugiere que las características específicas a nivel de la región latitudinal afectaron de manera similar ambas comparaciones. Sin embargo, el porcentaje de acuerdo MCL-MCG estuvo muy cerca del límite de confianza inferior de la comparación MCL-MCLa en las regiones antiboreal y tropical. Por lo tanto, las características locales que conducen a una mayor incertidumbre en tales regiones afectaron al MCG más que al MCL.

La resolución espacial del MCL y el MCG (1 km) parece ser demasiado detallada, teniendo en cuenta que en Argentina la relación entre el número de estaciones meteorológicas y el área del país (aproximadamente 3.000.000 km²) es mucho menor a 1 estación por kilómetro cuadrado. La resolución espacial puede afectar fuertemente las comparaciones de mapas categóricos (Chen *et al.* 2004, Lechner y Rhodes 2016)

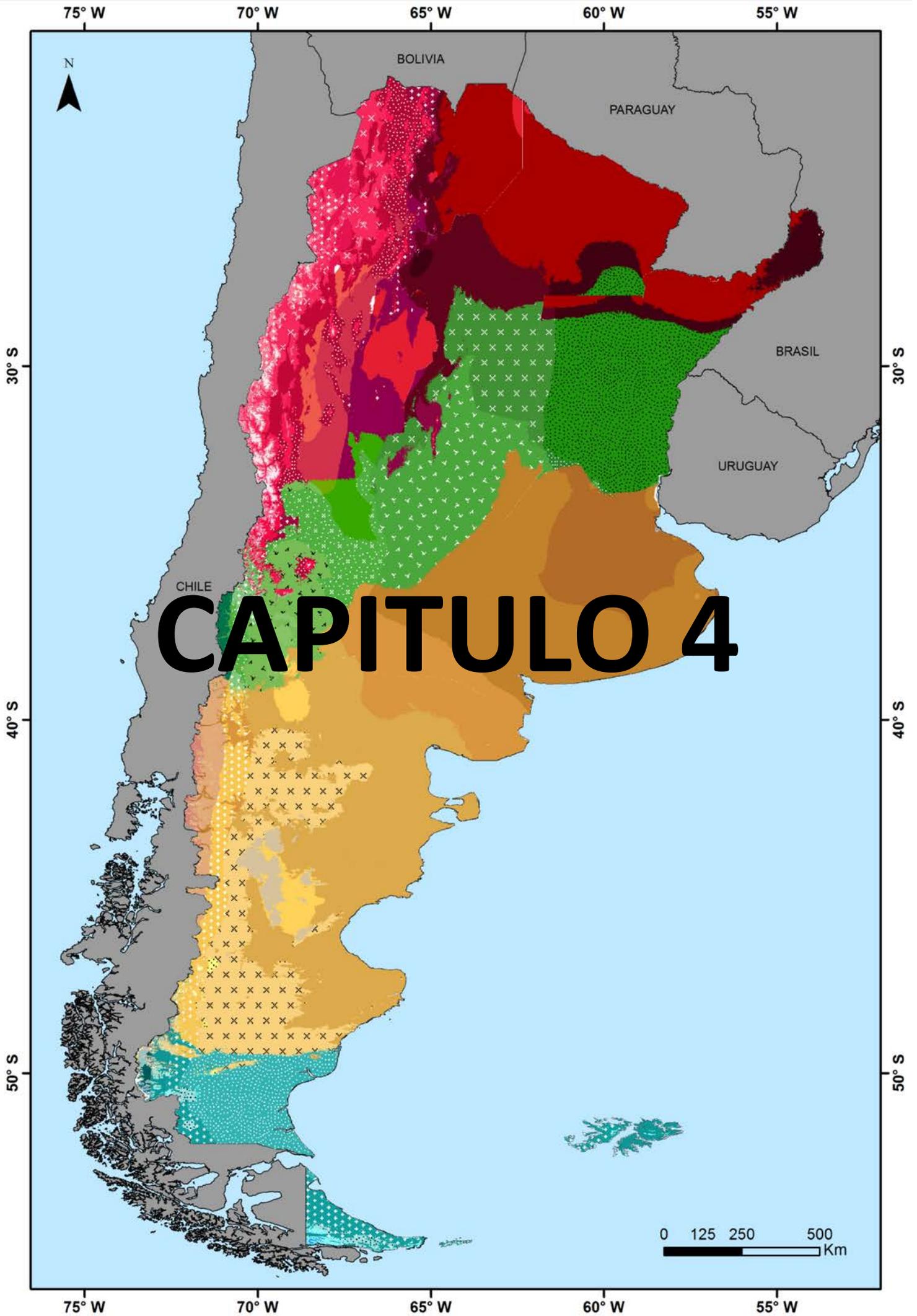
porque el acuerdo significa que se asignó la misma categoría a los mismos píxeles en ambos mapas. El requisito de una coincidencia espacial exacta no tiene en cuenta que podrían ocurrir píxeles etiquetados iguales dentro de una pequeña distancia espacial (Power *et al.* 2001, Pontious y Suedmeyer 2004). Por lo tanto, si los píxeles vecinos se agregan asignando la categoría predominante al nuevo píxel mayor, el ruido espacial disminuye y la concordancia tiende a aumentar. Sin embargo, en paisajes espacialmente complejos, la alta resolución espacial puede aumentar la precisión de la clasificación basada en imágenes de satélite (Chen *et al.* 2004). En este trabajo, aumentar el tamaño de píxel no mejoró el acuerdo MCL-MCG, lo que resalta que los modelos espaciales subyacentes a esos datos grillados son similares a una resolución espacial alta.

La resolución temática también es una característica relevante que afecta las comparaciones de mapas (Lechner y Rhodes 2016) y el análisis del paisaje. El acuerdo entre los mapas categóricos disminuye si se asignan diferentes categorías a los píxeles que son ambientalmente similares (Power *et al.* 2001, Pontious y Suedmeyer 2004). Por lo tanto, el acuerdo entre mapas puede aumentar cambiando la resolución temática (es decir, combinando categorías similares), como descubrieron Buyantuyev y Wu (2007) en el análisis de patrones de paisaje. Por otro lado, Salk *et al.* (2018) recomiendan explícitamente no combinar categorías porque este procedimiento aumenta el acuerdo por azar. En este trabajo, se agruparon zonas de vida para definir unidades ambientales basadas en rangos más amplios de biotemperatura y precipitación, resultando en una mejora del porcentaje de acuerdo MCL-MCG al reducir la resolución ambiental a una tasa mayor que el aumento de acuerdo por casualidad, especialmente en las regiones latitudinales con más bajo acuerdo. Por lo tanto, nuestro estudio sugiere que reducir la resolución ambiental puede ser útil en algunas situaciones.

No se encontró una tendencia clara en la asociación entre el porcentaje de acuerdo por región y la heterogeneidad topográfica. Se esperaba una asociación negativa entre esas variables ya que la heterogeneidad topográfica afecta la precisión de los procesos de estimación de modelos espaciales (Yao *et al.* 2013). Por otra parte, el acuerdo MCL-MCG tiende a aumentar claramente con el área de las regiones

latitudinales, porque en las grandes extensiones planas, las estimaciones fueron similares para ambas fuentes de datos climáticos. Este resultado sugiere que en regiones pequeñas pero topográficamente complejas, el porcentaje de concordancia MCL-MCG es bajo. Este patrón parece haber sido explicado por la relación entre el número de zonas de vida y el área de cada región latitudinal, mejor que con el índice de diversidad de Shannon que se utilizó para evaluar la heterogeneidad topográfica. El número de zonas de vida se relaciona con el rango de variación de condiciones bioclimáticas, de modo que un rango alto de variación, un área pequeña o la combinación de ambos factores da como resultado una relación alta y representa una variación ambiental a pequeña escala espacial. Por lo tanto, este estudio muestra que la alta diversidad bioclimática en áreas pequeñas constituye una situación compleja que promueve un bajo acuerdo entre mapas, y que esta situación se mejora al reducir la resolución ambiental en lugar de la resolución espacial. De esta manera, la búsqueda de una resolución temática (ambiental) adecuada parece relevante al aplicar modelos climáticos.

En conclusión, los resultados mostraron un acuerdo parcial con las hipótesis planteadas al haberse encontrado que el acuerdo entre los datos locales y globales es similar al acuerdo entre los datos locales cuando se toma en cuenta la incertidumbre asociada a su variabilidad. En segundo lugar, el acuerdo entre los datos locales y globales disminuye al aumentar la complejidad climática de las áreas donde se aplica, pero no mostró relación con la complejidad topográfica. En tercer lugar, el acuerdo no aumenta con la reducción de la resolución espacial pero sí con la disminución de la resolución temática. Los datos climáticos grillados son la base de muchos estudios ecológicos que evalúan las condiciones ambientales actuales y futuras. Los resultados obtenidos en este capítulo destacan la necesidad de cuantificar las incertidumbres de estos datos climáticos, especialmente en áreas climáticamente muy heterogéneas, y proporcionan formas de cuantificar y tratar esas incertidumbres. Es importante concluir que el no considerar las incertidumbres en los datos climáticos grillados puede conducir a evaluaciones y proyecciones ecológicas erróneas.



CAPITULO 4. APLICACIONES DEL SISTEMA DE ZONAS DE VIDA DE HOLDRIDGE

4.1 Introducción

Entre las numerosas aplicaciones que pueden tener los modelos de zonificación de la tierra (Mateucci *et al.* 2016), una zonificación de enfoque ecológico es fundamental para aportar a una mejor comprensión de la distribución de los sistemas ecológicos y la diversidad. El modelo de zonas de vida aborda este análisis utilizando solamente variables bioclimáticas, y de esta manera es posible analizar no sólo la situación actual de las zonas de vida, sino también evaluar las proyecciones de cambio para el sistema basadas en proyecciones de cambio climático.

Las proyecciones climáticas futuras se estudian a través de modelos climáticos globales (MCGs). Estos son complejos sistemas de *software* que representan numéricamente los procesos físicos (y en menor medida, químicos y biológicos) de la atmósfera, océanos, criósfera y la superficie terrestre, y en forma muy simplificada, de la biosfera. Son capaces de simular las características globales del clima y de sus cambios en el pasado reciente y por lo tanto son creíbles como herramienta para el desarrollo de escenarios climáticos globales futuros.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (i.e. IPCC, *Intergovernmental Panel on Climate Change*), presentó en su más reciente Informe de Evaluación (AR5) los nuevos datos correspondientes al Proyecto de inter-comparación de modelos de clima acoplados (i.e. CMIP5 por sus siglas en inglés, *Coupled Model Intercomparison Project*). Los mismos representan el marco de comparación diseñado para mejorar nuestro conocimiento del cambio climático (Taylor *et al.* 2012). El conjunto de datos del CMIP5 utiliza trayectorias de concentración representativas (i.e. RCP por sus siglas en inglés, *Representative Concentration Pathways*) de Gases de Efecto Invernadero (GEI), para generar proyecciones de los modelos climáticos que informan sobre las evaluaciones de los riesgos. Estas trayectorias incluyen un escenario¹ de mitigación estricto (RCP2.6), dos escenarios intermedios (RCP4.5 y RCP6.0) de emisiones moderadas, y un escenario con un nivel muy alto de emisiones

¹ Los escenarios de concentración se distinguen por el forzamiento radiativo en watts por metro cuadrado al que llegan en el año 2100. El forzamiento radiativo es el cambio en el flujo neto de energía radiativa hacia la superficie de la Tierra medido en el borde superior de la troposfera (a unos 12.000 m sobre el nivel del mar) como resultado de cambios internos en la composición de la atmósfera, o cambios en el aporte externo de energía solar. Se expresa en W/m². Un forzamiento radiativo positivo contribuye a calentar la superficie de la Tierra, mientras que uno negativo favorece su enfriamiento.

de GEI (RCP8.5), que sería de extremo calentamiento y al que se llegaría si no hubiera restricciones a las emisiones globales de GEI.

Los resultados de los MCGs vienen en escalas del orden de 100 kilómetros, - demasiado grandes para usarse cuando se trata de calcular los riesgos climáticos para un municipio, región o cuenca-. Una solución a esta problemática son las técnicas de reducción de escala (*downscaling*, e.g. Hijmans *et al.* 2005; Fick y Hijmans 2017) que permiten llegar a resoluciones espaciales de 1 Km o menos, y obtener proyecciones regionales del cambio climático. Los datos climáticos grillados de alta resolución, obtenidos por este proceso, permiten desarrollar instrumentos de evaluación eficientes y accesibles para la planificación de la conservación, modelos de distribución, el modelado de cultivos o de seguimiento de la biodiversidad.

El sistema de Holdridge puede representar uno de estos instrumentos, y para ello, es fundamental vincular las zonas de vida con los tipos de biomas de nuestro país. No sólo considerando el clima actual sino también bajo los posibles escenarios futuros establecidos en función de las proyecciones de cambio climático, dado que luego las variaciones en las zonas de vida permitirán monitorear qué ocurre con los distintos ambientes. En Argentina hay tres biomas principales: a) La estepa, que es una formación vegetal con predominio de gramíneas con dos períodos de reposo, uno en invierno ocasionado por el frío y otro en el verano ocasionado por sequía. El resto de la vegetación que puede aparecer dispersa determinará las distintas fisonomías de la estepa, por ejemplo estepa arbustiva, arbustiva xerófila, herbácea, de cactus, etc. b) El bosque, con predominio de árboles, sin formación de estratos, y con escasas lianas y epífitos. Hacia el centro y norte del país hay bosques con especies xerófilas (Chaco y Espinal) y hacia el sudoeste hay bosques templados (Bosques patagónicos). c) Las selvas, donde predominan árboles de gran altura, hay formación de distintos estratos, y abundancia de lianas y epífitos. Se hallan en áreas de nuestro país bajo la influencia de los climas más cálidos y húmedos, hacia el noreste (Paranense) y el noroeste (Yungas) (Apodaca 2016).

Los biomas de Argentina son representados en la zonificación ecológica de ecorregiones (Morello *et al.* 2012), una de las zonificaciones de más amplio uso en nuestro país, habitualmente consultada en distintos trabajos para obtener una primera aproximación a las características ecológicas y sociales de un área de estudio. La

asociación de la clasificación por ecorregiones con el sistema de zonas de vida permite monitorear las posibles transformaciones vinculadas al cambio climático en las ecorregiones y a través de este esquema, en los biomas del país, así como considerar las posibles implicancias.

Por otra parte, en nuestro país se busca tener representación de la diversidad de biomas a través de un Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP). Un Área Protegida (AP) "es un área manejada con normas que garantizan la protección de los recursos naturales, culturales y los servicios ecosistémicos". Su administración busca fundamentalmente alcanzar objetivos de conservación de muestras representativas del gran mosaico ambiental que posee Argentina (SiFAP 2019). Un AP puede estar administrada y gestionada por diferentes organismos o individuos, y según quién la gestione se considera pública, comunitaria, privada, o de régimen mixto. Según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), los objetivos de manejo pueden apuntar a la conservación estricta, la protección de un rasgo dado de la biodiversidad, el manejo del hábitat de una especie, o el uso sustentable de la biodiversidad, entre otros. De acuerdo a los objetivos planteados, las AP pueden ser clasificadas como: Categoría I. (a) Reserva Natural Estricta y (b) Área natural silvestre; Categoría II. Parque nacional; Categoría III. Monumento natural; Categoría IV. Área de manejo de hábitats / especies; Categoría V. Paisaje terrestre y marino protegido; Categoría VI. Área protegida manejada (Fundación Vida Silvestre Argentina 2019).

En este SNAP la diversidad bioclimática no se considera para la delimitación de las AP, y por lo tanto resulta igualmente importante evaluar en qué medida la diversidad de zonas de vida se encuentra representada en el SNAP, no sólo como objetivo de conservación sino también para la identificación y monitoreo de las AP más sensibles al posible impacto de los cambios climáticos.

A su vez, el sistema de zonas de vida resulta un esquema valioso para el diseño de la planificación del uso de la tierra (Derguy 2017), entendiendo uso de la tierra como el conjunto de actividades que la sociedad realiza en un territorio para producir, modificar o conservar su estado (Volante 2014). Por otra parte, el tipo de cubierta biofísica observada en la superficie de la tierra se denomina "cobertura de la tierra". Los cambios en la cobertura y el uso de la tierra están entre los principales conductores del "Cambio Global" -conjunto de cambios ambientales afectados por la

actividad humana, especialmente aquellos cambios en los procesos que determinan el funcionamiento del sistema Tierra-, que puede apreciarse en diferentes escalas (Volante *et al.* 2015). Los procesos históricos de cambio de uso de la tierra determinan tendencias de transformación que dependen de diferentes factores. Algunos condicionantes físicos de la aptitud de uso de la tierra son el clima, la topografía, el suelo o la hidrología (Drozd 2011). La generación de modelos explicativos y proyecciones de los cambios en el uso de la tierra requiere elaborar hipótesis acerca de la contribución relativa de estos factores. Es así que la asociación entre los patrones de uso de la tierra y las variables biofísicas que los condicionan se aplica con frecuencia para evaluar las probabilidades de transición entre tipos de cobertura (Paruelo *et al.* 2006).

Las unidades obtenidas a partir del modelo de zonas de vida delimitan ambientes bioclimáticamente homogéneos sobre los cuales se puede establecer el potencial fisiológico a desarrollarse. Evaluar la distribución de las actividades productivas –agrícola, ganadera, forestal, entre otras- en el esquema de zonas de vida permite conocer los límites bioclimáticos en los que cada actividad se desarrolla y, por lo tanto, si es sustentable a largo plazo y sus probabilidades de transición (Derguy 2017).

En Argentina, las producciones agrícola-ganaderas componen los principales usos de la tierra, con una creciente preponderancia de la agricultura, fenómeno que también se advirtió en el resto de Sudamérica. La expansión agrícola es un caso particular de los frecuentes cambios producidos por los humanos en el uso de la tierra (Paruelo *et al.* 2005). En el proceso de "agriculturización" del territorio, el cultivo de soja predomina sobre la superficie actual. Este proceso se produjo a expensas de tierras destinadas tradicionalmente a la ganadería y por deforestación de bosques nativos. Las transformaciones estuvieron asociadas, también, a diversos cambios tecnológicos y a las nuevas condiciones del mercado y los precios internacionales (Volante *et al.* 2015).

Los distintos usos de la tierra generan un impacto que puede derivar en la pérdida de diversidad biológica, de servicios ambientales y en la degradación de la capacidad productiva de los ecosistemas. Por ello, el análisis de cambios en el uso del territorio resulta fundamental para comprender la condición actual (Vázquez *et al.*

2016), ya que conocer la dinámica del sistema de cambio permite mejorar la planificación para producir respuestas anticipadas que puedan disminuir pérdidas y daños ambientales. Así, para la planificación del uso de la tierra y para la evaluación de sus consecuencias, es sumamente útil contar con estimaciones de las probabilidades de transición entre tipos de coberturas (Paruelo *et al.* 2006).

De acuerdo a Lugo y Morris (1982) y a Ewel (1999), en el esquema de Holdridge es posible identificar las zonas de vida de más alta productividad neta. De acuerdo a Ewel (1999), las zonas de vida más aptas para la producción son aquellas en las cuales las precipitaciones anuales no se desvían mucho de la relación de evapotranspiración potencial (EVP). El agua de riego (si es necesaria) se requiere solo en cantidades menores. A su vez, la lluvia no es tan alta como para que las plagas y la disolución de nutrientes resulten un problema. No es casual que en estas zonas de vida se produzca el asentamiento humano más denso en muchas partes del mundo. Las zonas de vida más frías son las menos utilizadas. Las zonas secas presentan una tendencia a concentrar la ganadería. Las zonas muy húmedas presentan en primer medida una explotación forestal de maderas nativas, seguida de plantaciones forestales exóticas.

Bajo este esquema, el sistema de zonificación de Holdridge presenta buenas posibilidades para proyectar la aptitud de uso de la tierra a partir de los posibles cambios en las variables bioclimáticas.

Los objetivos de este capítulo fueron: evaluar la representación de los cambios climáticos proyectados para Argentina en el sistema de zonas de vida; analizar la correlación entre la clasificación por zonas de vida y la delimitación geográfica de las ecorregiones del país bajo un escenario de clima actual y bajo distintos escenarios de clima futuro, así como la distribución areal de las zonas de vida en el Sistema Nacional de Áreas Protegidas; y analizar la concordancia entre la clasificación por zonas de vida y la distribución geográfica de los principales usos de la tierra bajo un escenario de clima actual y bajo distintos escenarios de clima futuro.

Las hipótesis de trabajo fueron:

- 1) Las ecorregiones representan áreas de homogeneidad ecológica y en consecuencia existe una correspondencia entre las ecorregiones y las condiciones bioclimáticas, definida como la existencia de zonas de vida propias.

2) La correspondencia entre las ecorregiones y las zonas de vida observada en las condiciones climáticas actuales refleja la congruencia entre múltiples factores físicos y los esquemas biogeográficos. Esa correspondencia tenderá a disminuir como consecuencia de los cambios climáticos proyectados para Argentina por los modelos climáticos globales. Este efecto será mayor que el vinculado a la incertidumbre propia de los modelos climáticos locales, que aquí representa el error en la estimación de los Índices de Correspondencia para las condiciones climáticas actuales.

3) Los tipos de uso de la tierra dependen de características climáticas y en consecuencia existe una correspondencia entre los usos de la tierra y las condiciones bioclimáticas, definida como la existencia de zonas de vida propias.

4) La correspondencia entre los tipos de uso de la tierra y las zonas de vida observada en las condiciones climáticas actuales refleja la congruencia entre múltiples factores físicos y los esquemas biogeográficos. Esa correspondencia tenderá a disminuir como consecuencia de los cambios climáticos proyectados para Argentina por los modelos climáticos globales. Este efecto será mayor que el vinculado a la incertidumbre propia de los modelos climáticos locales, que aquí representa el error en la estimación de los Índices de Correspondencia para las condiciones climáticas actuales.

4.2 Materiales y métodos

4.2.1 Fuentes de datos climáticos para el modelado

Los escenarios de cambio para modelar el sistema de zonas de vida estuvieron basados en las proyecciones de cambio climático definidas para Argentina en el proyecto “Tercera Comunicación Nacional a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático” generado por el Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA). Este Centro hizo una evaluación de las tendencias del clima del país desde la segunda mitad del siglo XX y una proyección del clima futuro (siglo XXI) (SAyDS 2014). Para el modelado de escenarios futuros que se desarrolla en este capítulo, se consideraron diversos aspectos propuestos por el CIMA que se enumeran a continuación:

1) Elección de los modelos basada en la regionalización del territorio. Se divide al país en 4 zonas para analizar con diferentes modelos recomendados que presentan un mejor ajuste a cada región. Las zonas del país son: Húmeda (Misiones, Corrientes, Santa Fe, Entre Ríos y Buenos Aires), Centro (La Pampa, San Luis, Córdoba, Tucumán, Santiago del Estero, Chaco y Formosa), Andina (Mendoza, San Juan, La Rioja, Catamarca, Salta y Jujuy) y Patagonia (Neuquén, Río Negro, Chubut, Santa Cruz, Tierra del Fuego e Islas Malvinas).

2) Horizontes temporales. Se modelaron los escenarios climáticos del siglo XXI para dos horizontes temporales: clima futuro cercano (FC), se considera de interés para las políticas de adaptación, y clima futuro lejano (FL), se considera de carácter informativo sobre el largo plazo. Los períodos seleccionados para la representación de estos escenarios son los propuestos en el Quinto Informe de Evaluación del IPCC (IPCC 2014). Así, el clima futuro cercano fue representado por el período 2041-2060 (en adelante, 2050) y el clima futuro lejano fue representado por el período 2061-2080 (en adelante, 2070).

3) Escenarios RCP. Se modelaron proyecciones climáticas de dos escenarios RCP, 4.5 y 8.5. El primero corresponde a emisiones moderadas, y el escenario RCP 8.5 corresponde al caso extremo en que las emisiones continuaran creciendo con las tendencias actuales hasta fin de siglo. En el caso del RCP 2.6, se considera que los cambios serían semejantes a los del escenario 4.5 en el horizonte temporal de futuro cercano y con escasos cambios adicionales hacia fin de siglo. Por esta razón, no se estudiaron los escenarios climáticos basados en el RCP 2.6 al considerar que no aportaría información adicional.

4) Modelos climáticos globales (MCGs). Se seleccionaron los modelos que mejor ajustan a cada región. Es interesante señalar que de acuerdo al CIMA, no se recomienda ningún modelo para usar individualmente en la representación del clima futuro de las cuatro regiones, reflejando así la diversidad de los forzamientos geográficos del clima, propios de un país muy extenso y las limitaciones de los modelos en reproducirlos. Los modelos seleccionados para la Región Húmeda fueron: CCSM4 (NCAR, Estados Unidos), CMCC-CM (Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici, Italia) y NorESM1-M (Norwegian Climate Centre, Noruega); para la Región Centro: CNRM-CM5 (Centre National de Recherches Meteorologiques, Francia), y

MRI/CGM3 (MRI, Japón); para la Región Andes: IPSL-CM5A-MR (Institut Pierre Simon Laplace, Francia) y MPI-ESM-LR (Max Planck Institute for Meteorology, Alemania); y para la Región Patagonia: GFDL-ESM2G (NOAA-GFDL, Estados Unidos) y GFDL-CM3 (NOAA-GFDL, Estados Unidos).

Los modelos seleccionados fueron descargados de la base de datos climáticos globales WorldClim (<https://www.worldclim.org/CMIP5v1>) en coordenadas geográficas de latitud y longitud (Sistema de Referencia de Coordenadas WGS84), con una resolución espacial de 1km². Si bien el CIMA recomienda el uso de cuatro modelos por región, debido a la disponibilidad de modelos en los distintos horizontes temporales y escenarios RCP, se trabajó con dos modelos por región. La elección de esta base de datos (WorldClim) se debió a la posibilidad de trabajar con proyecciones climáticas en la misma resolución que fue generado el mapa de zonas de vida actual, y a las comparaciones previas que se abordaron en el capítulo 3 de este trabajo de tesis para los datos INTA y WorldClim actuales.

De cada modelo seleccionado desde la base de datos de WorldClim se tomó la temperatura media anual y la precipitación total anual para cada horizonte temporal (futuro cercano -2050- y futuro lejano -2070-), y para cada escenario de RCP (4.5 y 8.5). Se trabajó entonces con un total de ocho modelos -dos por región-: CCSM4 y NorESM1-M para la Región Húmeda; CNRM-CM5 y MRI/CGM3 para la Región Centro; IPSL-CM5A-MR y MPI-ESM-LR para la Región Andes; y finalmente, GFDL-ESM2G y GFDL-CM3 para la Región Patagonia. A través del uso del *software* de Sistemas de Información Geográfica (SIG) libre y gratuito Qgis 2.14 se calculó la media de los modelos por región. Luego, aplicando un mosaico se combinaron espacialmente las medias resultantes para obtener una única capa continua que cubra todo el territorio. Los datos de temperatura y precipitación derivados de los modelos se usaron luego para proyectar las zonas de vida en los escenarios, FC-RCP 4.5, FC-RCP8.5, FL-RCP 4.5 y FL-RCP 8.5, a través de una serie de comandos (script) en el *software* de uso libre y gratuito R.

4.2.2 Caracterización bioclimática de ecorregiones y usos de la tierra

Como parte de la vinculación de las zonas de vida actuales y proyectadas a futuro con los biomas de Argentina, se comparó espacialmente el mapa de zonas de

vida con el mapa de ecorregiones (Morello *et al.* 2012; Fig. 18), a las que se les asignó a la vez una denominación fisonómica sobre la base de las descripciones establecidas en su propia definición, así como en el establecimiento de esquemas fitogeográficos (Cabrera 1976; Oyarzabal *et al.* 2018).

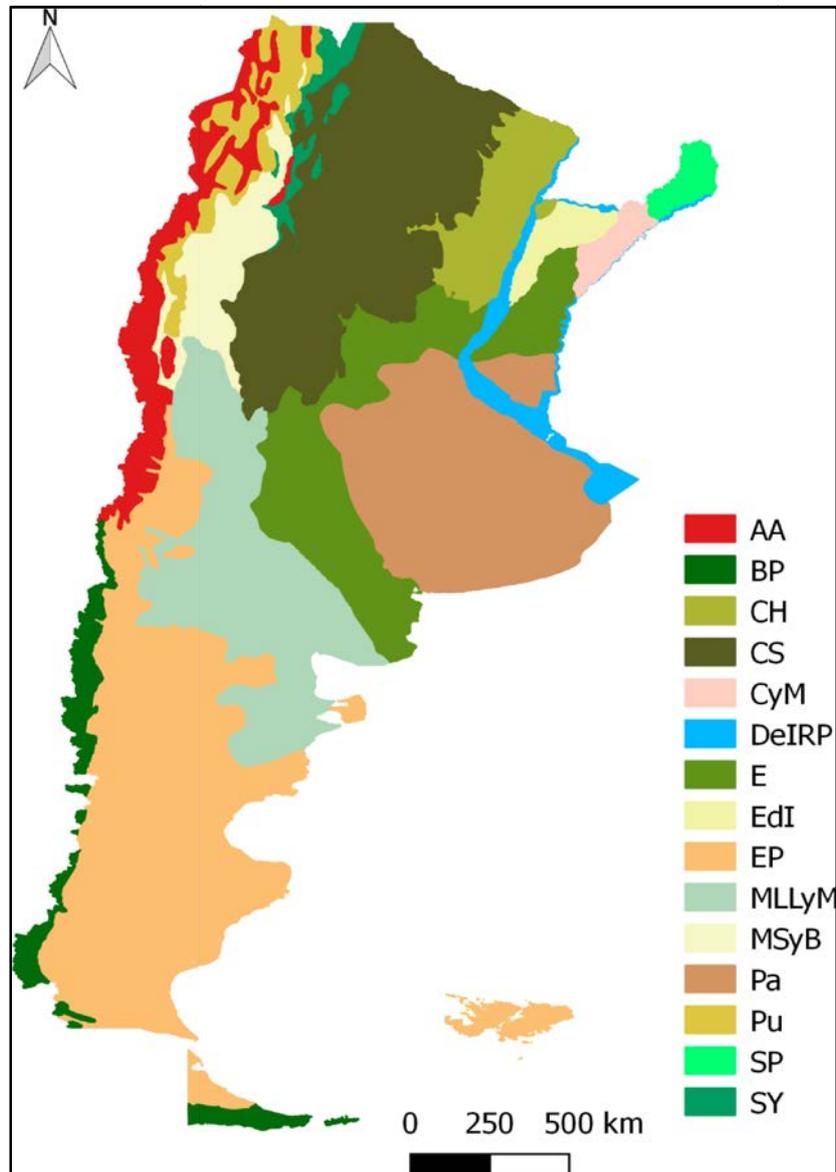


Figura 18. Mapa de las ecorregiones terrestres de Argentina modificado de Morello *et al.* 2012. Altos Andes (AA), Bosques Patagónicos (BP), Chaco Húmedo (CH), Chaco Seco (CS), Campos y Malezales (CyM), Delta e Islas del Río Paraná (DeIRP), Espinal (E), Esteros del Ibera (EdI), Estepa Patagónica (EP), Monte de Llanuras y Mesetas (MLLyM), Monte de Sierras y Bolsones (MSyB), Pampa (Pa), Puna (Pu), Selva Paranaense (SP), Selva de Yungas (SY).

Por otra parte, las zonas de vida actuales y futuras se vincularon con los usos de la tierra agrícola, silvícola y ganadero que se desarrollan en el país. También se incluyeron los bosques naturales o seminaturales y los parques nacionales con fines comparativos. Las unidades de uso de la tierra seleccionadas para el análisis se definieron sobre la base del mapa de tipos de uso/cobertura de la tierra de Bran *et al.* 2018 (Fig. 19), estos usos -agrícola, silvícola y ganadero- se definen en el texto "actividad productiva".

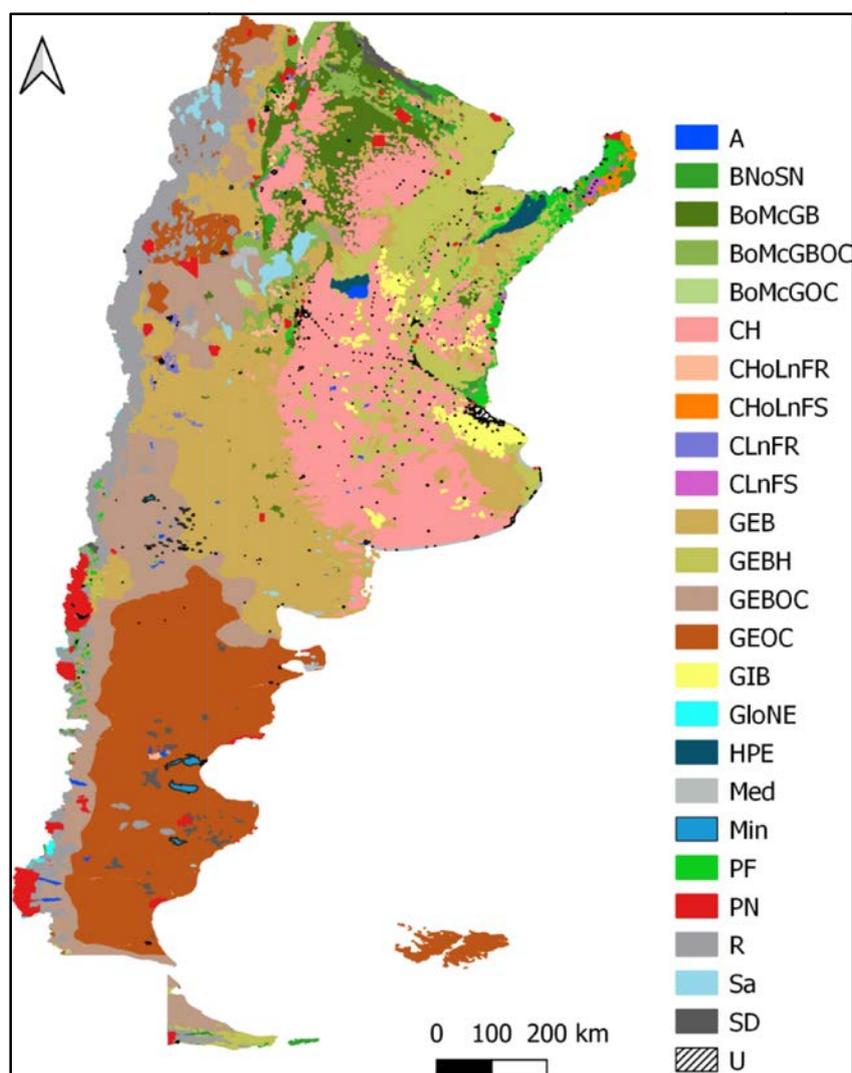


Figura 19. Mapa de los usos/coberturas de la tierra en Argentina, modificado de Bran *et al.* 2018. Cuerpos de Agua (A), Bosque Natural o seminatural (BNoSN), Bosque o matorrales con uso ganadero con predominio de bovinos (BoMcGB), Bosque o matorrales con uso ganadero con predominio de bovinos, ovinos y/o caprinos (BoMcGBOC), Bosque o matorrales con uso ganadero con predominio de ovinos y/o

caprinos (BoMcGOC), Cultivo de herbáceas (CH), Cultivo de herbáceas o leñosas no forestales bajo riego (CHoLnFR), Cultivo de herbáceas o leñosas no forestales en seco (CHoLnFS), Cultivo de leñosas no forestales bajo riego (CLnFR), Cultivo de leñosas no forestales en seco (CLnFS), Ganadería extensiva con predominio de bovinos (GEB), Ganadería extensiva con predominio de bovinos, ovinos y/o caprinos (GEBOC), Ganadería extensiva con predominio de ovinos y/o caprinos (GEOC), Ganadería extensiva en humedales con predominio de bovinos (GEBH), Ganadería Intensiva con predominio bovino para leche (GIB), Glaciares o nieves eternas (GloNE), Humedales, pantanos o esteros (HPE), Médanos (Med), Peladales o badlands (SD), Petróleo o minería (Min), Plantaciones forestales (PF), Parques nacionales (PN), Afloramiento rocosos (R), Salares o Salinas (Sa), Áreas Urbanas (U).

Para ambas comparaciones, -zonas de vida y ecorregiones, y zonas de vida y usos de la tierra- se establecieron índices bioclimáticos, el "índice de correspondencia bioclimática" (ICB) y el "índice de diversidad bioclimática" (IDB).

Con el ICB se buscó identificar aquellas ecorregiones (EC) o usos de la tierra (UT) que presentaran mayor correspondencia con el bioclima -zonas de vida- y aquellas en donde la correspondencia fuera menor. En el primer caso, las EC o UT tienen zonas de vida que les son propias y no comparten características bioclimáticas con otras regiones. Serían por tanto EC o UT controlados por el clima. Las EC o UT que tienen menos correspondencia con el clima pueden compartir zonas de vida con otras EC o UT, que en lo climático se les parecen, y donde entonces son otros los factores que provocan diferencias biogeográficas.

El ICB tiende a uno si las zonas de vida son exclusivas de la EC o UT y disminuye a medida que la EC o UT tiene zonas de vida muy compartidas con otras. A mayor índice podría esperarse que la EC o la unidad donde se desarrolla un determinado UT cambien frente a un cambio climático. Por otra parte, para ver cuánto cambio podemos tomar como real se calcularon límites de confianza. Si los límites son estrechos, es probable que un pequeño cambio afecte la EC o UT de manera creíble; si los límites son amplios se espera que el nivel de confianza de ese resultado sea menor.

El IDB es básicamente una adaptación del índice de diversidad de Shannon-Wiener (Shannon y Weaver 1963) a las zonas de vida. Con este índice se buscó evaluar cuáles son las EC o UT con mayor y menor diversidad bioclimática, a la vez que se

comparó la correspondencia de los índices ICB e IDB entre sí y para las distintas EC o UT.

Para el cálculo de los índices bioclimáticos en un escenario actual, se utilizó la base de datos INTA (Bianchi y Cravero 2010), en formato vectorial de puntos con una distribución espacial regular cada 1 km que cubre toda Argentina. Esta capa vectorial además de la temperatura, precipitación y altura en msnm, tiene incorporado para cada punto el atributo de EC o UT que le corresponde espacialmente. La misma estructura se utilizó para las proyecciones a futuro pero con los datos de temperatura y precipitación, que surgieron de los modelos climáticos globales de WorldClim 2.14 (Fick y Hijmans 2017).

Se modelaron las zonas de vida para las condiciones de clima actual y luego se realizaron 1000 simulaciones en las cuales las condiciones fueron alteradas sobre la base de las diferencias entre los datos de temperatura y precipitación de INTA y de las 80 estaciones del SMN, de la misma manera que lo indicado en el capítulo 3. A partir de ese proceso se obtuvieron 1000 valores de ICB e IDB para cada ecorregión y tipo de uso. A partir de esos 1000 valores se tomaron los cuantiles 5 y 95 como los límites inferior y superior para cada índice. Dadas las iteraciones, se obtienen para cada una de las EC o UT 1000 valores de ICB y 1000 valores de IDB, a la vez que se generan 1000 valores de límite de confianza superior y 1000 valores de límite de confianza inferior para cada valor de índice. Como expresión final de los índices bioclimáticos y sus respectivos límites de confianza se calculó la media de los valores obtenidos, y se designaron como: ICB medio (ICBm) e IDB medio (IDBm) a las medias de los valores de índices; ICB superior (ICBs) e IDB superior (IDBs) a las medias de los valores de límite de confianza superior; ICB inferior (ICBi) e IDB inferior (IDBi) a las medias de los valores de límite de confianza inferior.

Los mismos índices se calcularon con los datos de temperatura y precipitación derivados de los modelos proyectados a futuro (WorldClim) para los cuatro escenarios posibles, escenario uno (e1 o FC-RCP 4.5), escenario dos (e2 o FC-RCP8.5), escenario tres (e3 o FL-RCP 4.5) y escenario cuatro (e4 o FL-RCP 8.5). Los índices bioclimáticos futuros (ICBf e IDBf) se compararon con aquellos obtenidos a partir del modelo climático actual (INTA) y sus límites de confianza.

Para continuar evaluando la vinculación de las zonas de vida actuales y proyectadas a futuro con los biomas de Argentina y con los usos de la tierra que se desarrollan en el territorio, se buscó conocer la relación de las EC entre sí y de los UT entre sí, en base a sus características bioclimáticas actuales y proyectadas a futuro. Para esto, se vincularon los mapas de zonas de vida actual y futuros (e1, e2, e3 y e4) con el mapa de EC por un lado, y con el mapa de UT por otro, a través del geoproceto de intersección en el *software* Qgis 2.14. Este proceso se aplica a dos capas vectoriales y devuelve un nuevo conjunto de datos con los objetos espaciales y los atributos en común entre las capas de entrada. Luego de intersectar las zonas de vida con EC y UT, se proyectan estas capas a un Sistema de Referencia de Coordenadas (SRC) plano, UTM zona 20 Sur en este caso, para calcular las áreas en hectáreas (ha) de las unidades u objetos espaciales obtenidos durante la intersección. Como resultado se generaron tablas de contingencia que contienen el dato de área en ha de cada zona de vida por EC o UT, estas tablas que fueron usadas como insumo para el análisis de correspondencia entre zonas de vida y ecorregiones y usos de la tierra (AC; Greenacre y Primicerio 2013). Este análisis multivariado se utilizó para analizar las diferencias en las proporciones ocupadas por las zonas de vida dentro de cada ecorregión o tipo de uso. La base de datos estuvo conformada por una matriz rectangular con categorías de ecorregiones o tipos de uso en filas y zonas de vida en columnas y el área en ha en cada celda. El AC calcula distancias en Chi cuadrado entre filas y columnas y resulta adecuado para el análisis de proporciones (Greenacre y Primicerio 2013). Las áreas fueron transformadas a raíz cuadrada para reducir las diferencias entre ecorregiones de diferentes tamaños. El gráfico obtenido a través del AC permitió analizar relaciones de distancia gráfica proporcionales a diferencias en las proporciones ocupadas por cada zona de vida entre ecorregiones. Las distancias gráficas resultaron proporcionales a las diferencias bioclimáticas entre ecorregiones.

Los AC aplicados con zonas de vida, calculadas sobre la base de datos climáticos actuales y futuros, para cada ecorregión y tipo de uso permitieron evaluar gráficamente las tendencias de cambio de las ecorregiones y tipos de uso en el marco de los gradientes bioclimáticos observados en las condiciones actuales.

Las zonas de vida en el Sistema Nacional de Áreas Protegidas

Para el análisis de la distribución de las zonas de vida en el Sistema Nacional de Áreas Protegidas se seleccionaron las categorías de parques nacionales y provinciales como representativos del SNAP (Fig. 20). Se realizó la unión espacial de las capas de AP nacionales y de AP provinciales, luego se aplicó una intersección espacial entre este resultado y el mapa de zonas de vida actual usando el *software* Qgis 2.14. Finalmente se calculó el área en ha de las distintas unidades obtenidas y se calculó en porcentaje la superficie de las zonas de vida incluidas en el SNAP, tanto a nivel país como por región latitudinal.

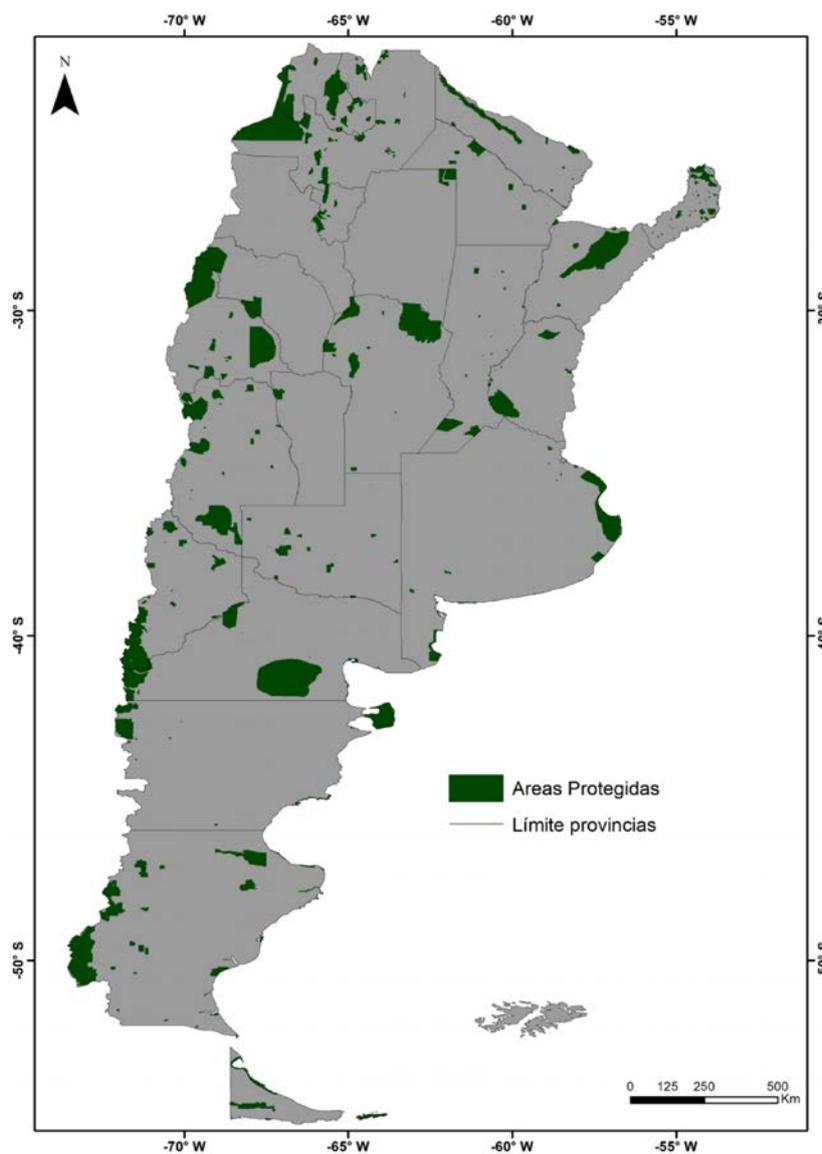


Figura 20. Distribución del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP) de Argentina representado en este trabajo por los parques nacionales y provinciales.

4.2.3 Categorización bioclimática y su potencial para el uso de la tierra

El mapa actual de zonas de vida se categorizó en los cuatro grandes grupos - Demasiado frío, Demasiado seco, Óptimo para la producción, Demasiado húmedo- establecidos por Lugo y Morris (1982, Fig. 21) y se aplicó el geoproceso de intersección entre éste mapa y las unidades que representaban los usos agrícola, silvícola y ganadero del mapa de uso de la tierra de Bran *et al.* (2018). A partir de la capa resultante se analizó si la distribución de estos UT en las zonas de vida de Argentina sigue el esquema de potencialidad de uso propuesto. Finalmente se identificaron las zonas de vida más aptas del territorio para la actividad agrícola, silvícola y ganadera. No se consideraron aquellas zonas de vida definidas en la categoría “Demasiado frío” por considerarse no productivas.

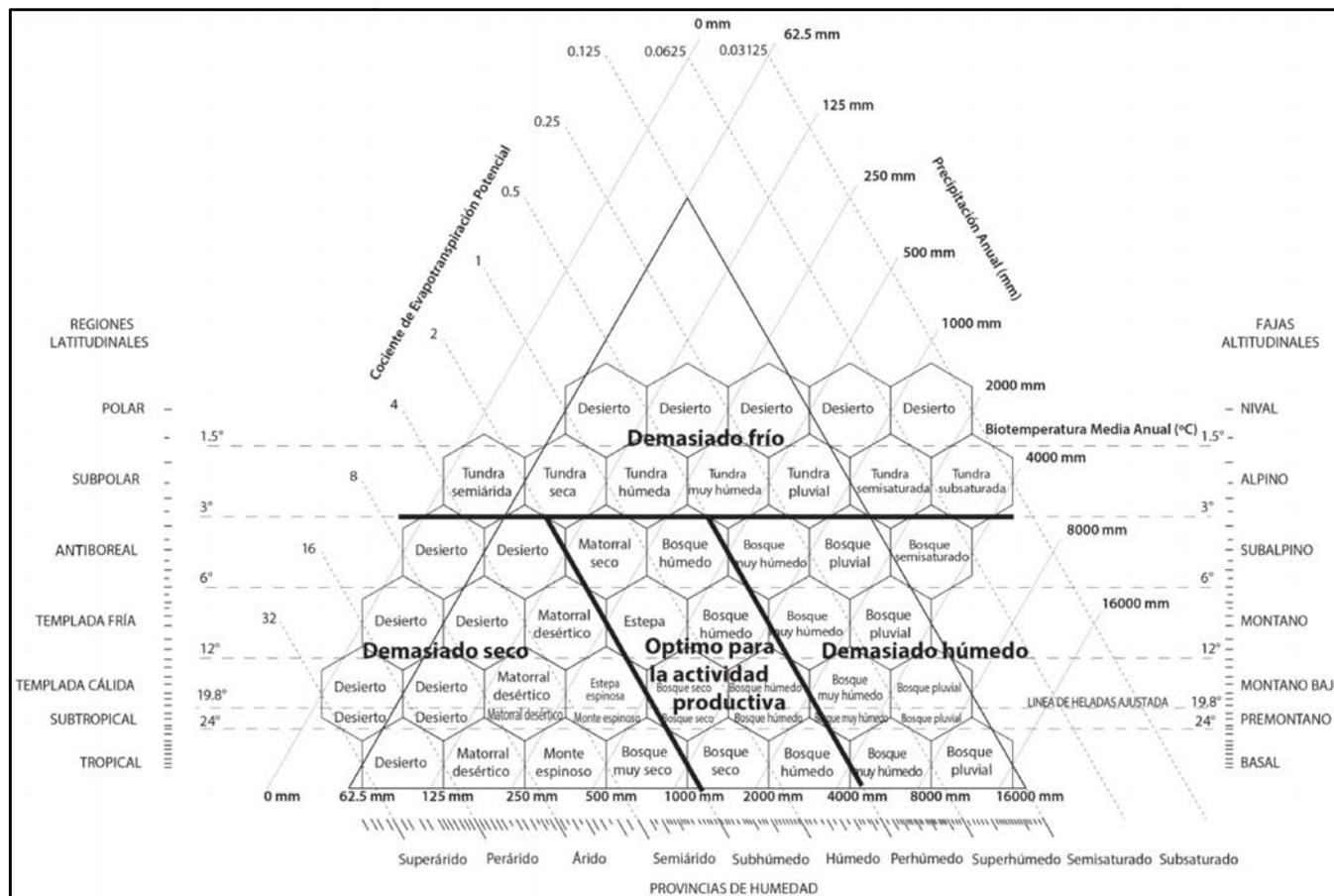


Figura. 21. Las zonas de vida de Holdridge agrupadas en cuatro categorías, de acuerdo a su aptitud para la actividad productiva (modificado de Lugo Y Morris 1982). En este trabajo se entienden como actividad productiva los usos de la tierra agrícola, silvícola y ganadero.

4.3 Resultados

4.3.1 Zonas de vida y cambio climático

El modelado del sistema de zonas de vida en los escenarios de cambio climático, proyectados para el país y analizados a nivel de las regiones latitudinales, muestra por un lado una marcada tendencia a la desaparición de la Región Latitudinal Antiboreal (RAB), y por otro lado una ampliación de la Región Latitudinal Tropical (RT) uniformemente hacia el sur. La Región Latitudinal Subtropical (RS) tiende a reducirse producto del avance de la RT, a la vez que sufre un corrimiento hacia el sur con el consecuente desplazamiento de la línea de heladas -límite entre las regiones latitudinales subtropical y templada cálida-. La Región Latitudinal Templada Cálida (RTC) también se desplaza hacia el sur, en detrimento de la Región Latitudinal Templada Fría (RTF) que si bien se reduce notablemente, termina cubriendo por completo el área definida como RAB en el escenario actual. Estos cambios se observan en el escenario 1 (FC-RCP.4.5), se mantienen y amplían levemente en los escenarios 2 (FC-RCP 8.5) y 3 (FL-RCP 4.5), mientras que se profundizan en el escenario 4 (FL-RCP 8.5) (Fig. 22, 23, 24, 25, 26).

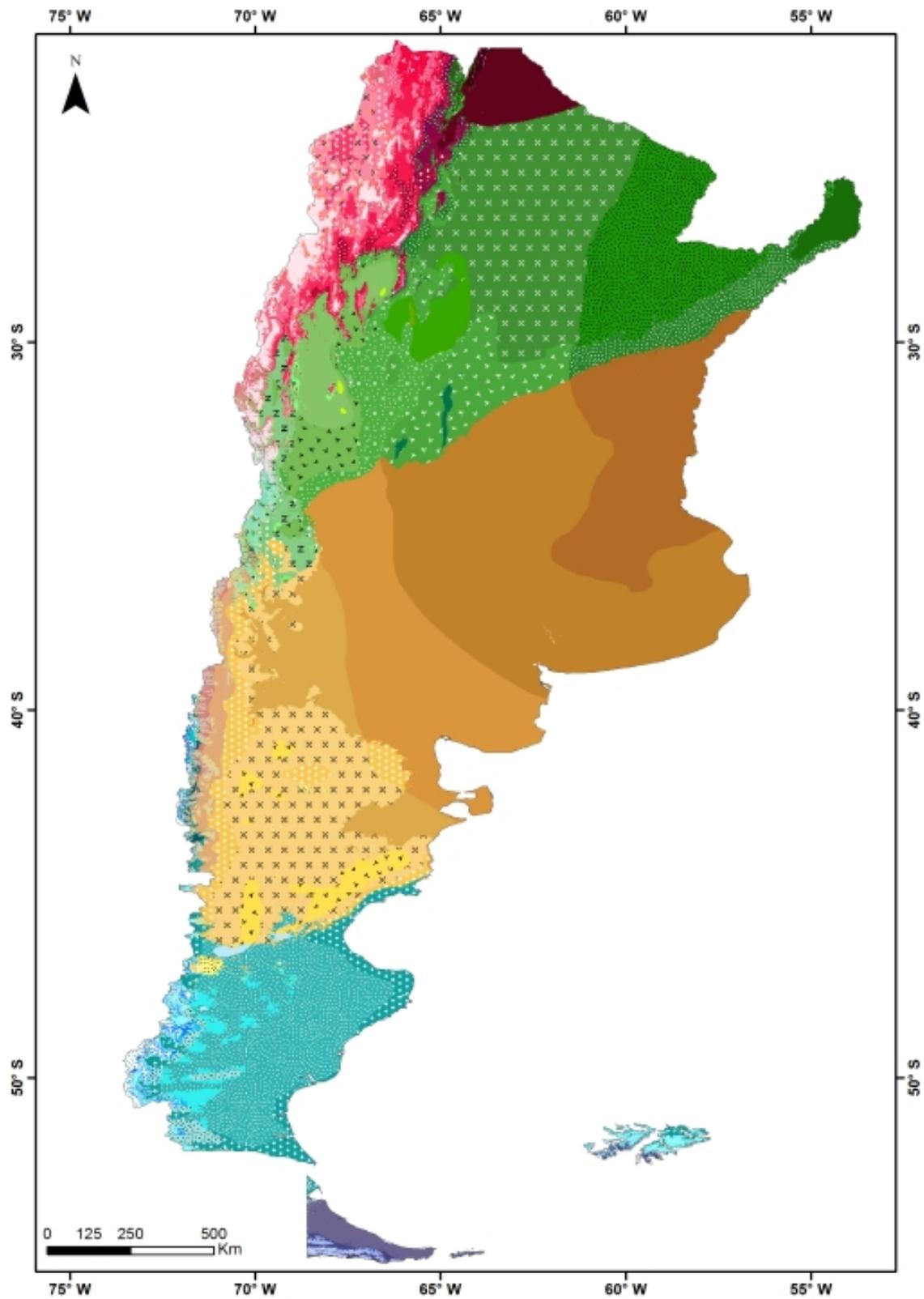


Figura 22. Zonas de vida por región latitudinal en el escenario climático actual de Argentina.

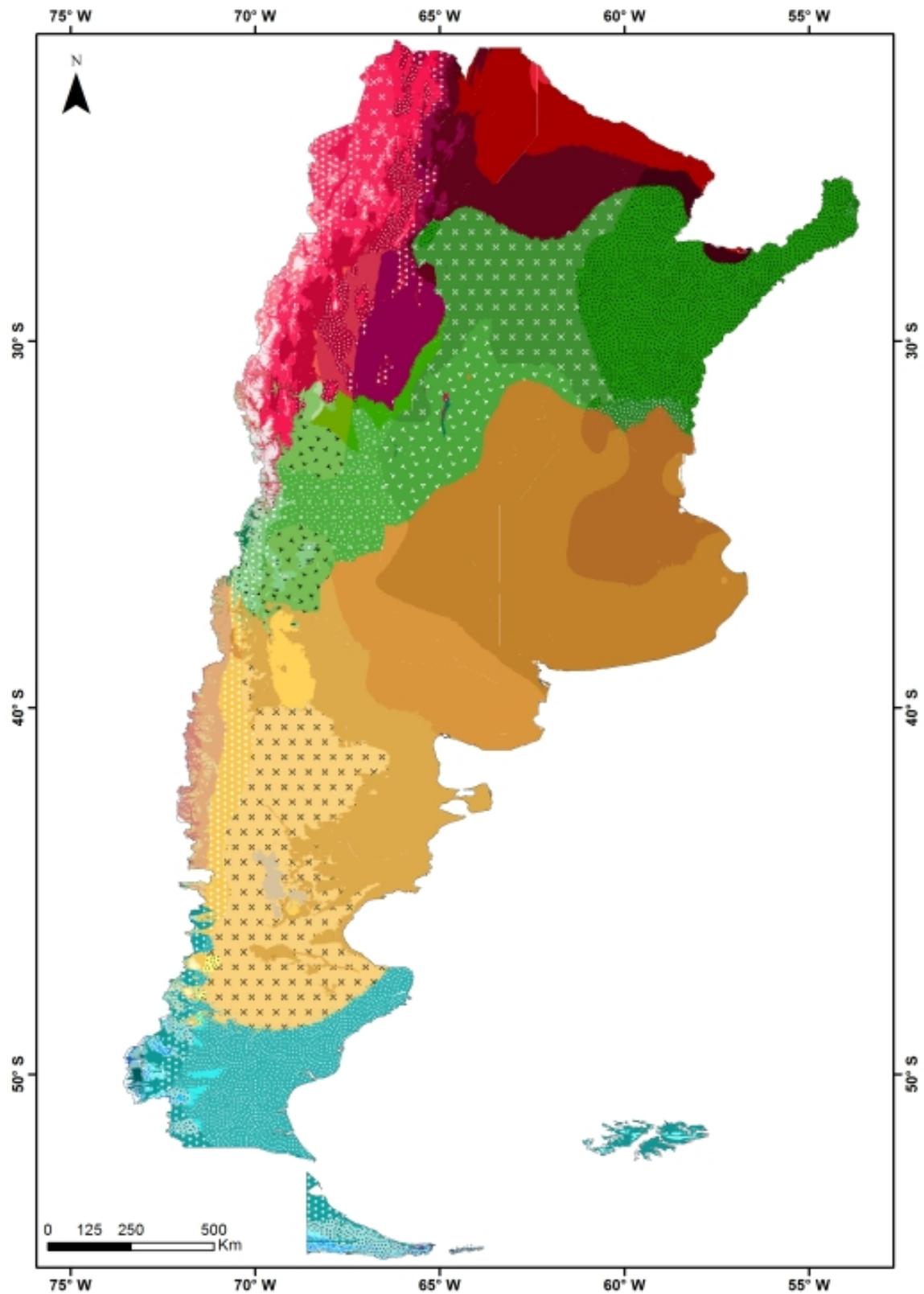


Figura 23 Zonas de vida por región latitudinal en el escenario climático e1 (FC-RCP 4.5) de Argentina.

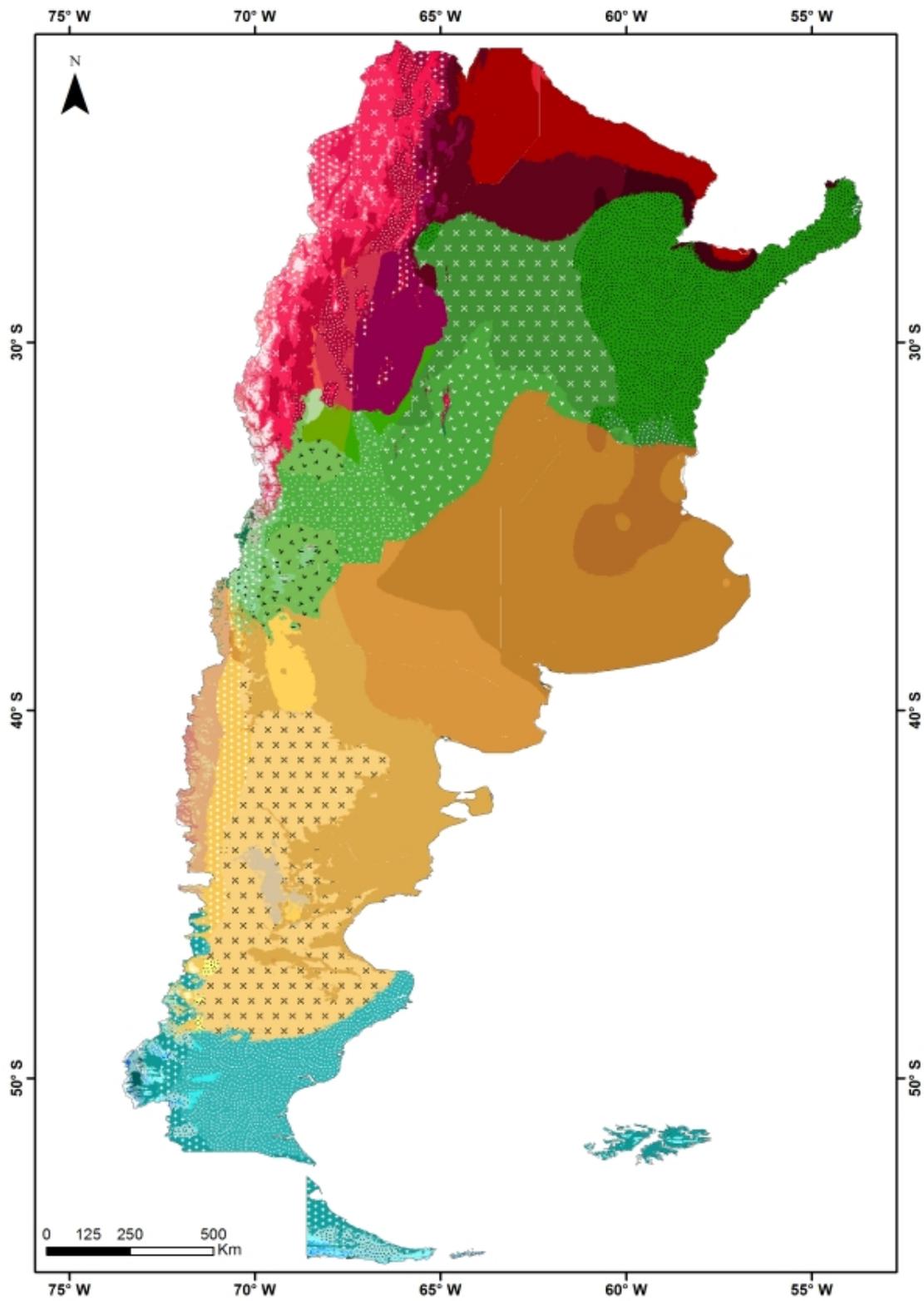


Figura 24. Zonas de vida por región latitudinal en el escenario climático e2 (FC-RCP 8.5) de Argentina.

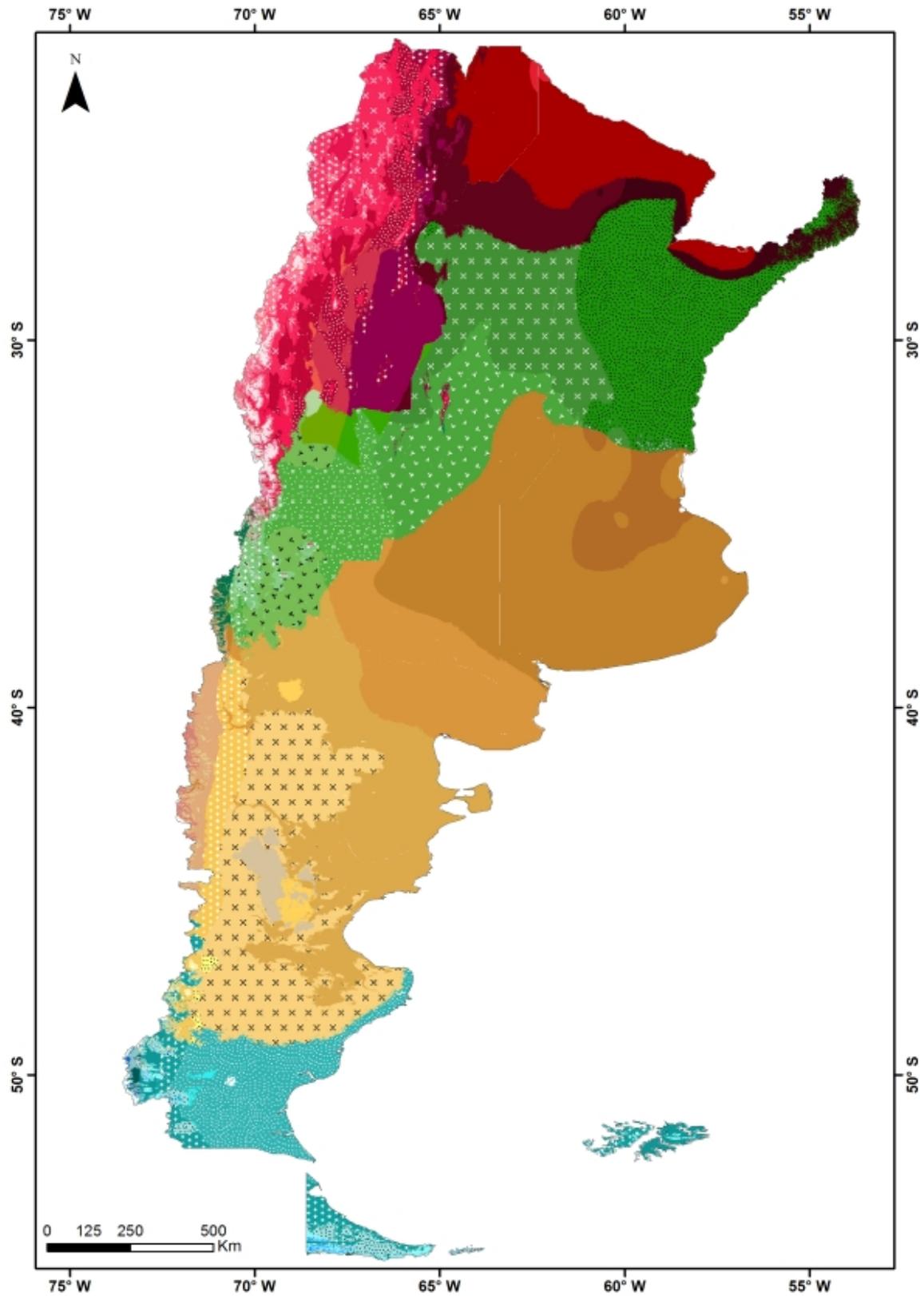


Figura 25. Zonas de vida por región latitudinal en el escenario climático e3 (FL-RCP 4.5) de Argentina.

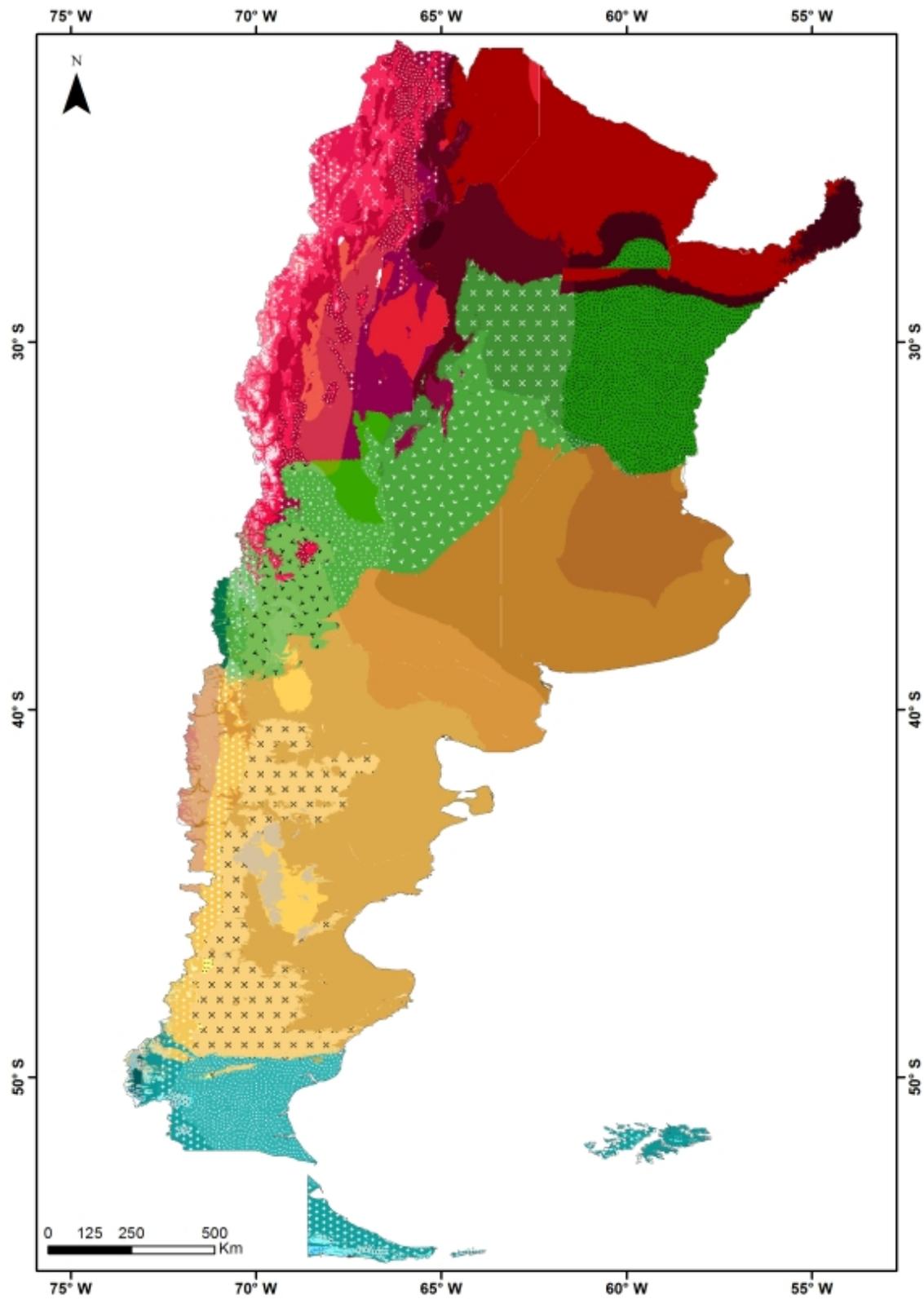


Figura 26. Zonas de vida por región latitudinal en el escenario climático e4 (FL-RCP 8.5) de Argentina.

La comparación visual del escenario actual de la Región Tropical (RT) con los escenarios de cambio futuro, mostró una disminución en la cantidad de zonas de vida y una marcada tendencia hacia un bioclima más cálido y seco, con la desaparición de las zonas de vida húmedas y/o muy húmedas (*e.g.* Bosque Húmedo Premontano, Bosque Húmedo Montano Bajo y Bosque muy Húmedo Montano Bajo, Bosque Húmedo Subalpino y Bosque muy Húmedo Subalpino). Un cambio importante observado desde el escenario 1 y mantenido en los restantes escenarios, es la presencia del Piso Altitudinal Basal en la Región Tropical, que no sucede en el escenario climático actual, y que implica la ocurrencia para esta región de biotemperaturas medias anuales de entre 24 a 30° C a nivel del mar, representadas por las zonas de vida de Monte Espinoso y Bosque seco. A la vez que los desiertos ampliaron su extensión (*e.g.* Desierto Superárido Montano Bajo, Desierto Montano Bajo, Desierto Perárido Montano, Desierto Subalpino) (Fig. 27, 28, 29, 30, 31)

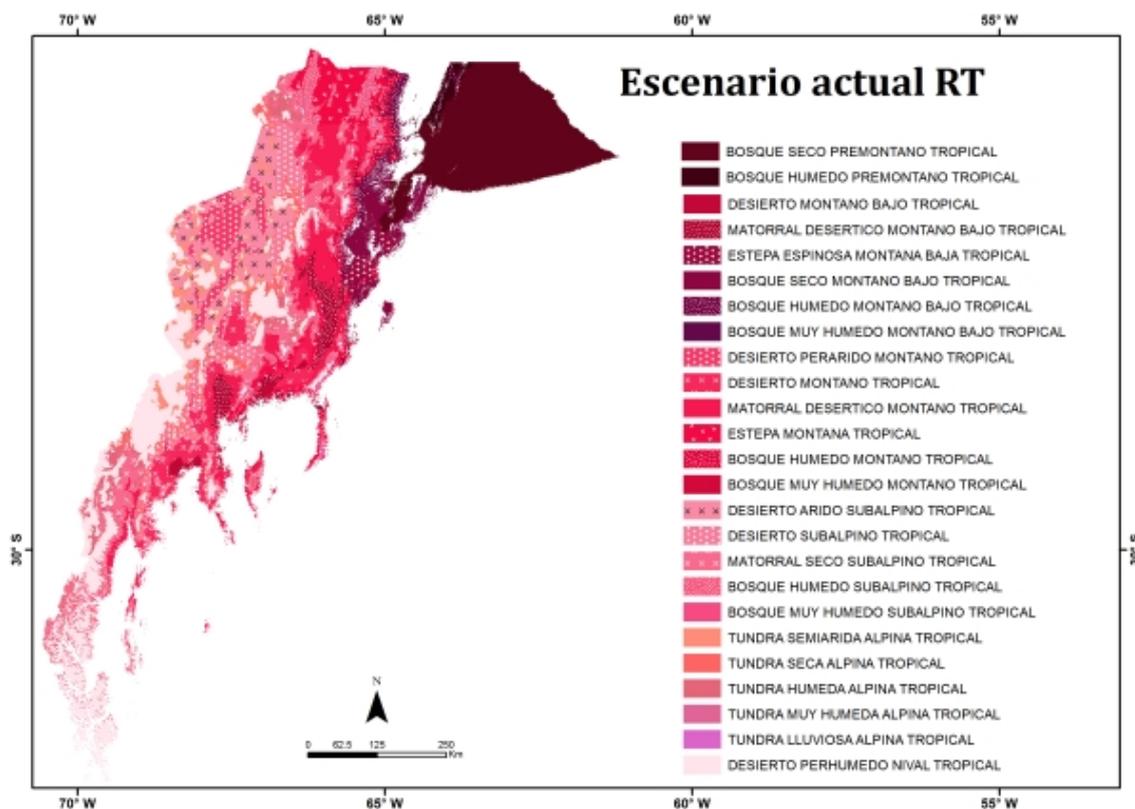


Figura 27. Zonas de vida en el escenario climático actual de la RT.

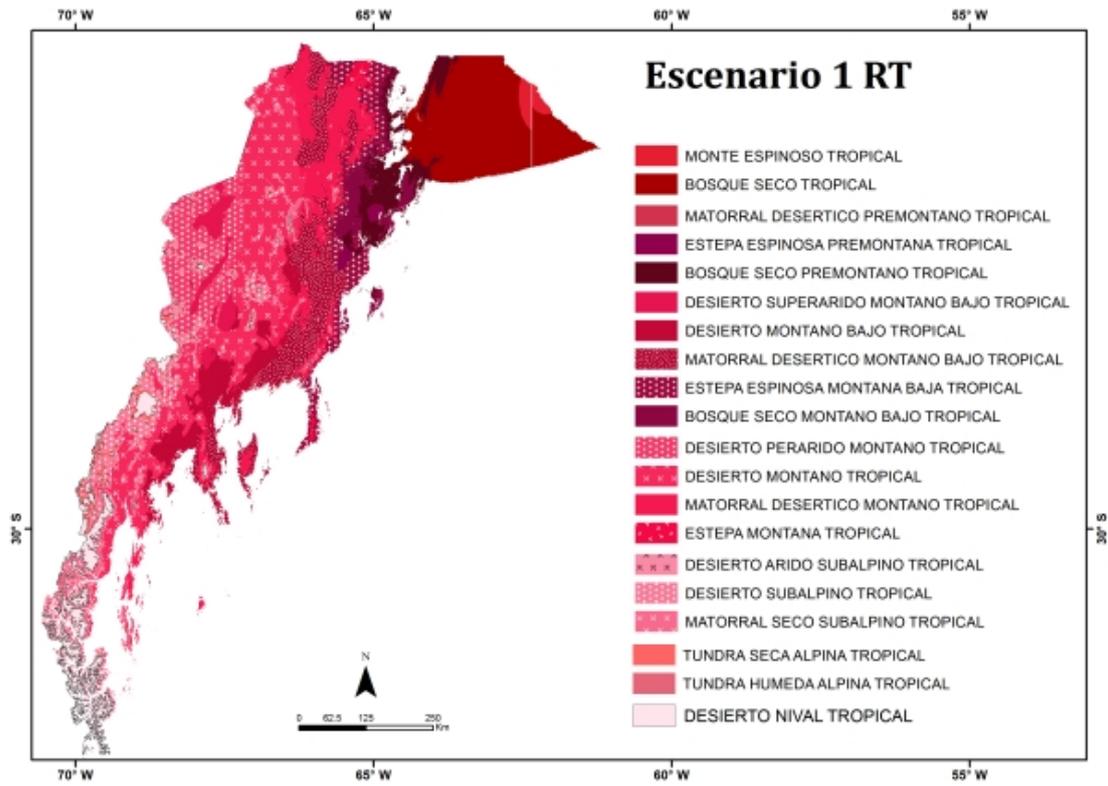


Figura 28. Zonas de vida en el escenario climático e1 (FC-RCP 4.5) de la RT.

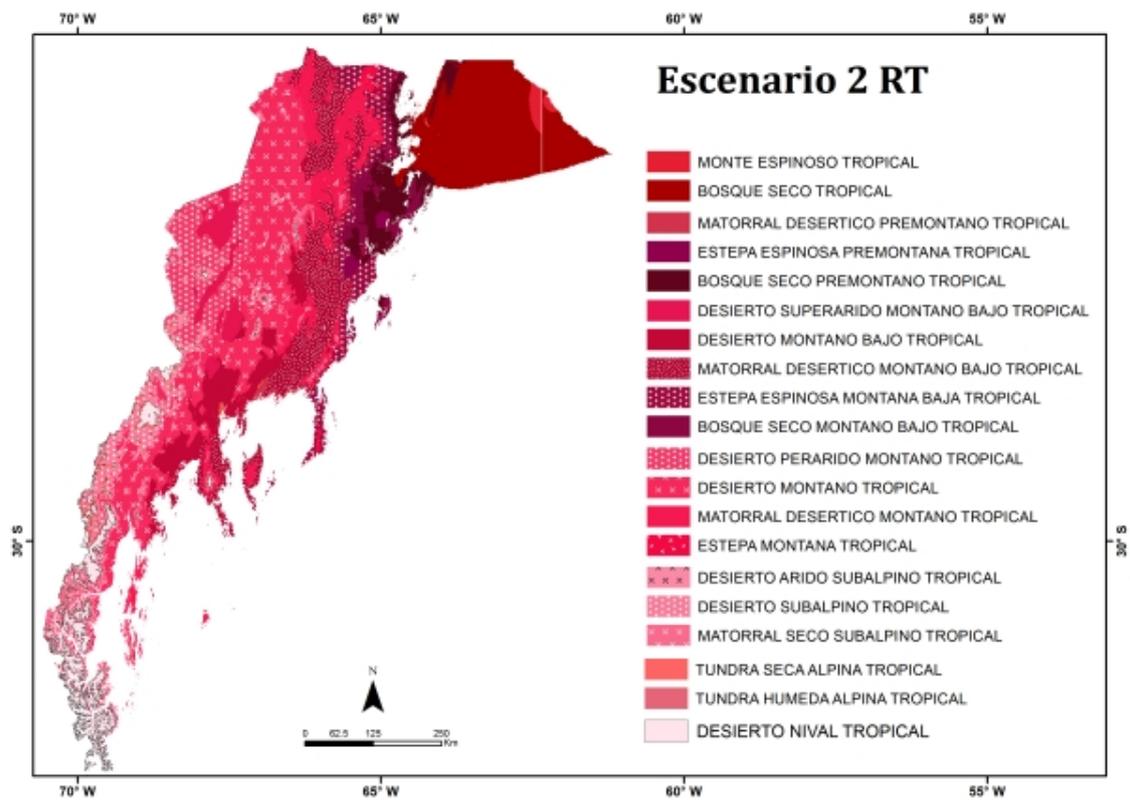


Figura 29. Zonas de vida en el escenario climático e2 (FC-RCP 8.5) de la RT.

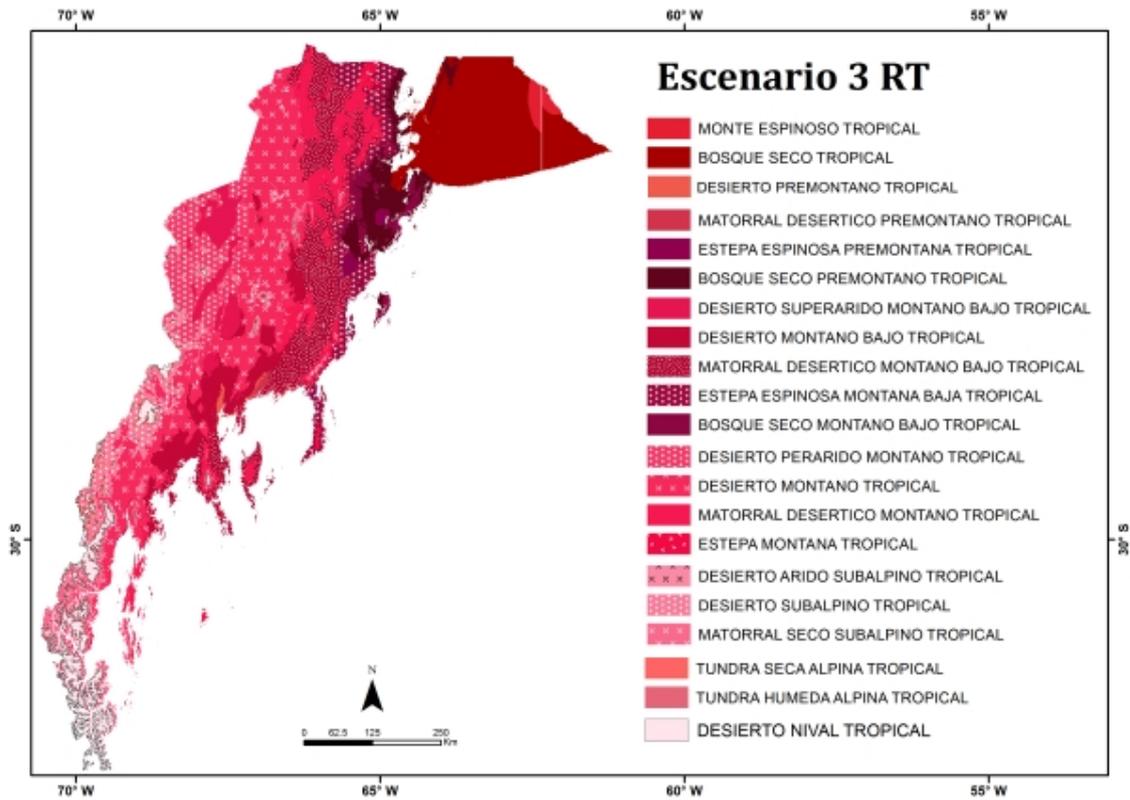


Figura 30. Zonas de vida en el escenario climático e3 (FL-RCP 4.5) de la RT.

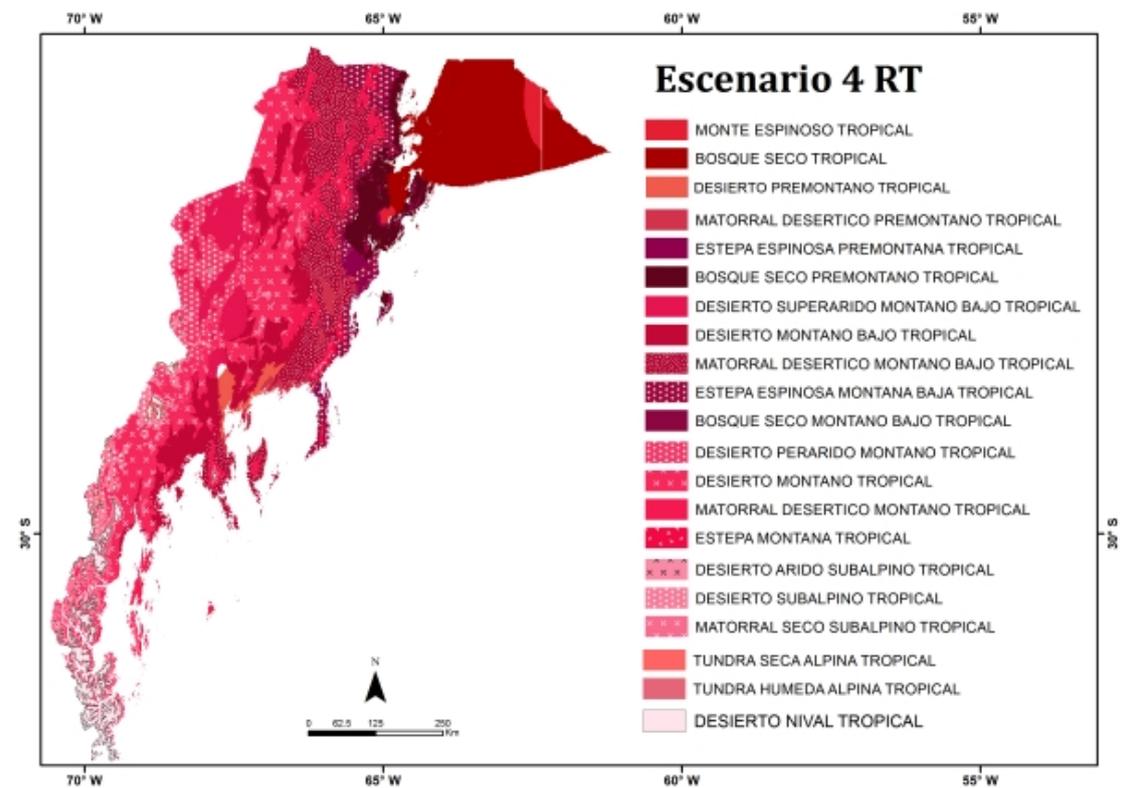


Figura 31 Zonas de vida en el escenario climático e4 (FL-RCP 8.5) de la RT.

En el territorio definido originalmente como Región Subtropical (RS) bajo el escenario climático actual se observó el avance de la RT bajo los escenarios de cambio climático. La cantidad de zonas de vida determinadas para la región no experimentó grandes cambios en cantidad ni en el tipo de zonas de vida. Aunque se observó la pérdida de las zonas más húmedas del Piso Altitudinal Alpino -Tundras Húmedas, muy Húmedas, Lluviosas y Semisaturadas- y el Piso Altitudinal Nival -Desierto Semisaturado-; mientras que el Bosque Húmedo Montano Bajo y el Bosque muy Húmedo Montano Bajo experimentó una notable reducción en los escenarios 1 y 2, hasta desaparecer en el e3 (Fig. 32, 33, 34, 35, 36).

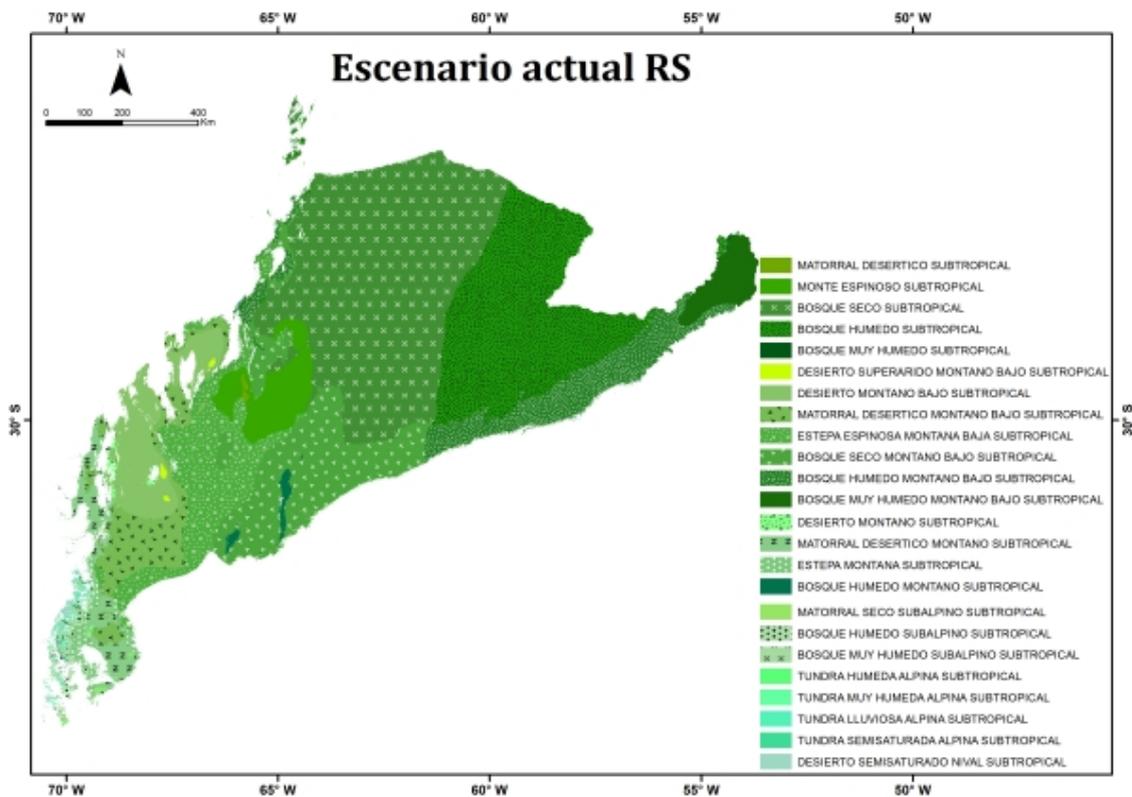


Figura 32. Zonas de vida en el escenario climático actual de la RS.

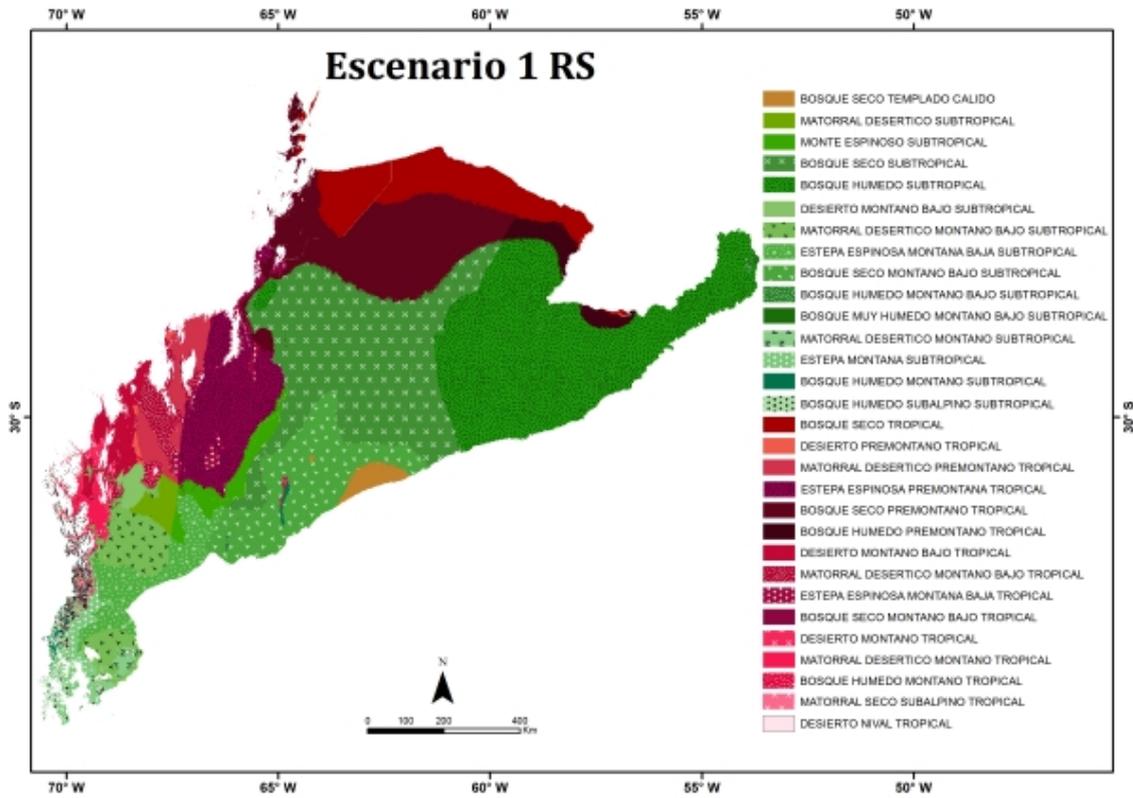


Figura 33 Zonas de vida en el escenario climático e1 (FC-RCP 4.5) de la RS.

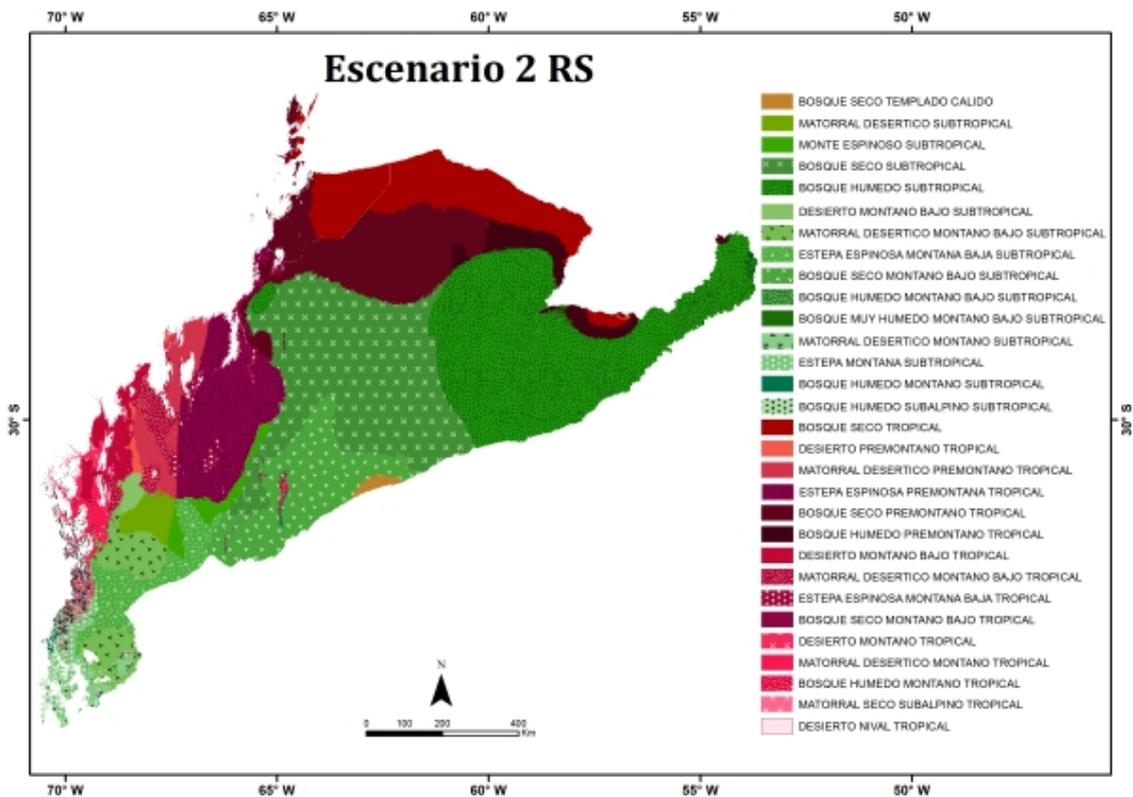


Figura 34 Zonas de vida en el escenario climático e2 (FC-RCP 8.5) de la RS.

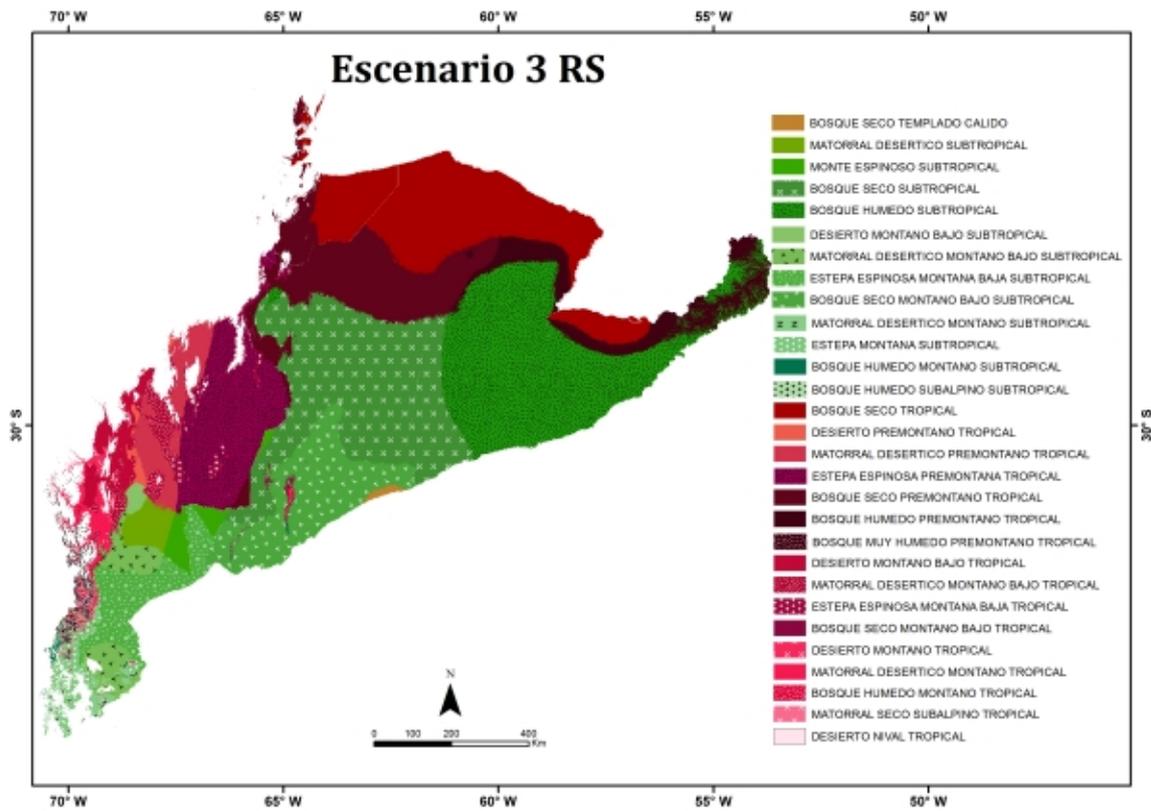


Figura 35. Zonas de vida en el escenario climático e3 (FL-RCP 4.5) de la RS.

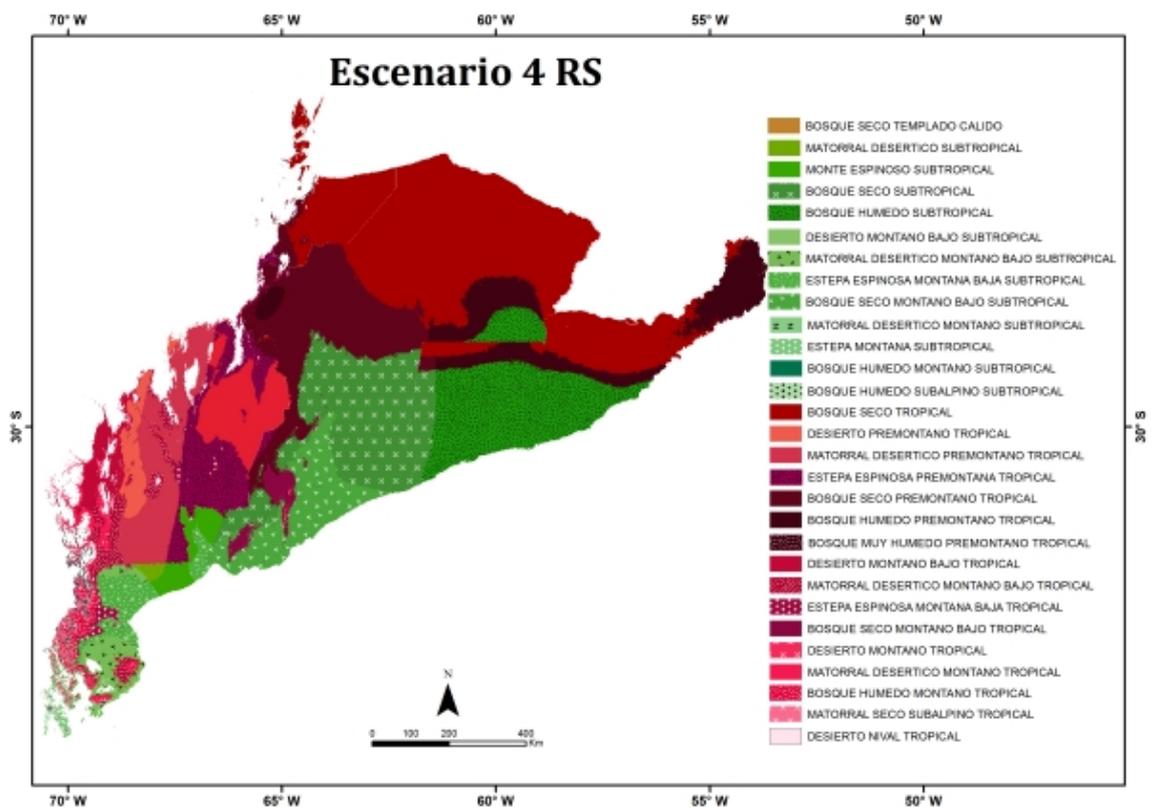


Figura 36. Zonas de vida en el escenario climático e4 (FL-RCP 8.5) de la RS.

La Región Templada Cálida (RTC) fue la región latitudinal donde se registraron menores cambios, el desplazamiento hacia el sur del territorio de las zonas de vida que componen esta región es tal vez la modificación más notable. El Sistema de las Sierras de Ventania en la Provincia de Buenos Aires -zona donde se encuentran numerosos endemismos y es en parte Área Protegida- es representado por un sector del Bosque Húmedo Montano Templado Cálido en el escenario actual, esta zona de vida se reduce en los escenarios de cambio y con esta reducción desaparece la individualización bioclimática del Sistema de las Sierras de Ventania (Fig. 37, 38, 39, 40, 41)

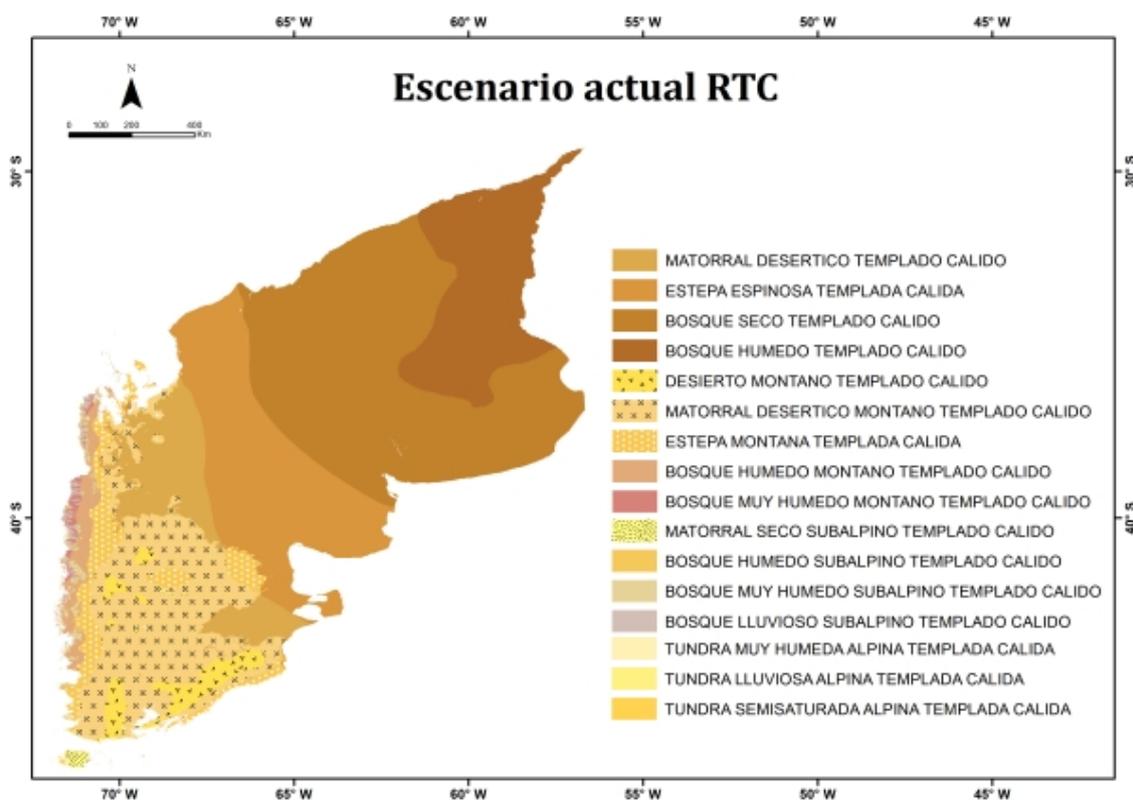


Figura 37. Zonas de vida en el escenario climático actual de la RTC.

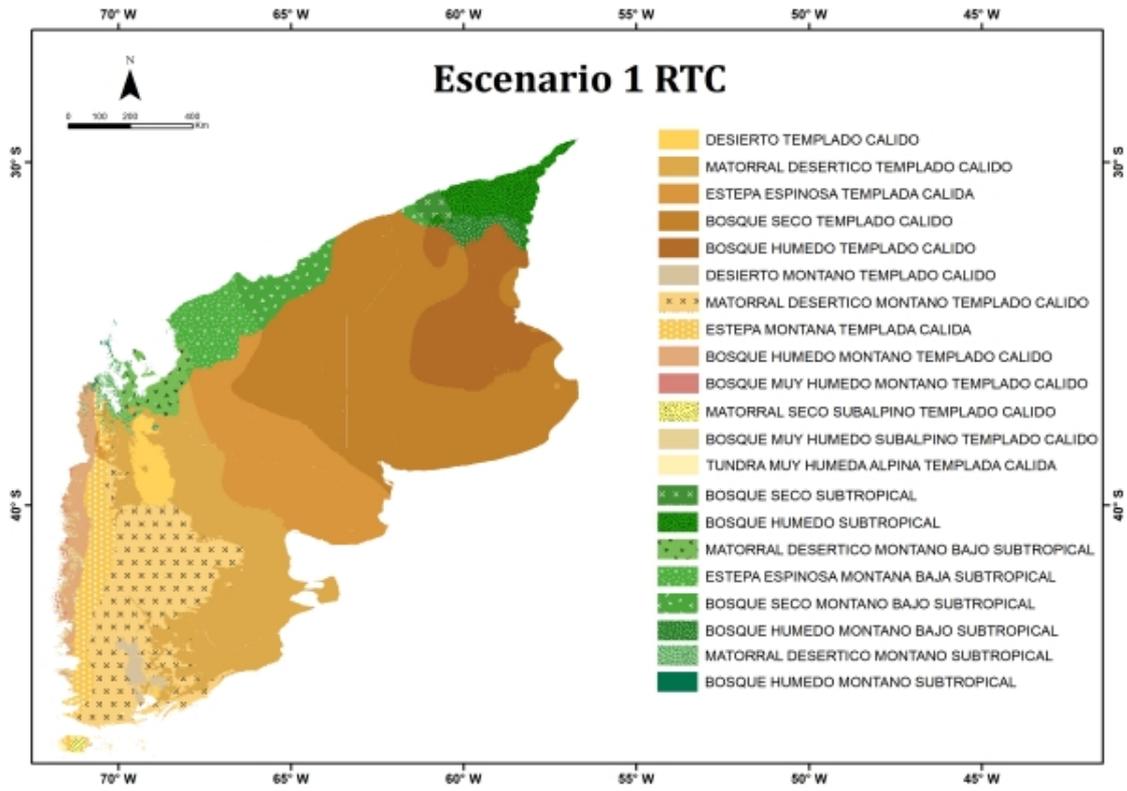


Figura 38. Zonas de vida en el escenario climático e1 (FC-RCP 4.5) de la RTC.

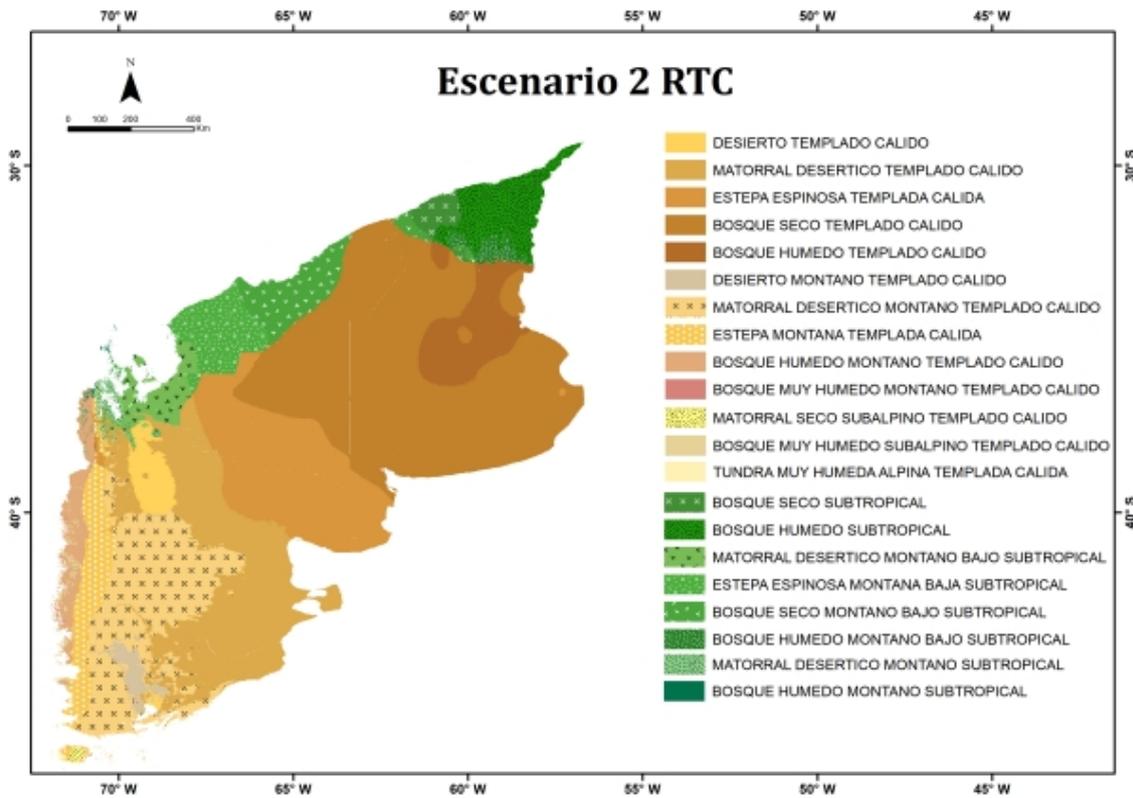


Figura 39. Zonas de vida en el escenario climático e2 (FC-RCP 8.5) de la RTC.

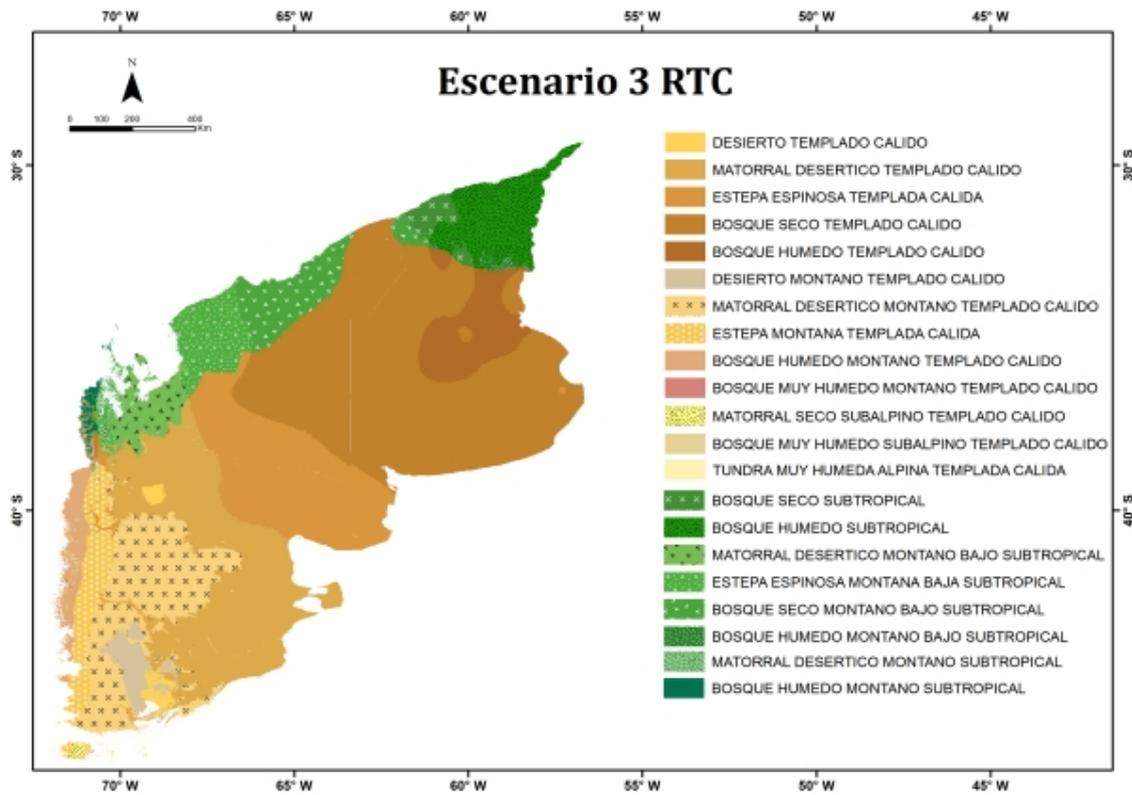


Figura 40. Zonas de vida en el escenario climático e3 (FL-RCP 4.5) de la RTC.

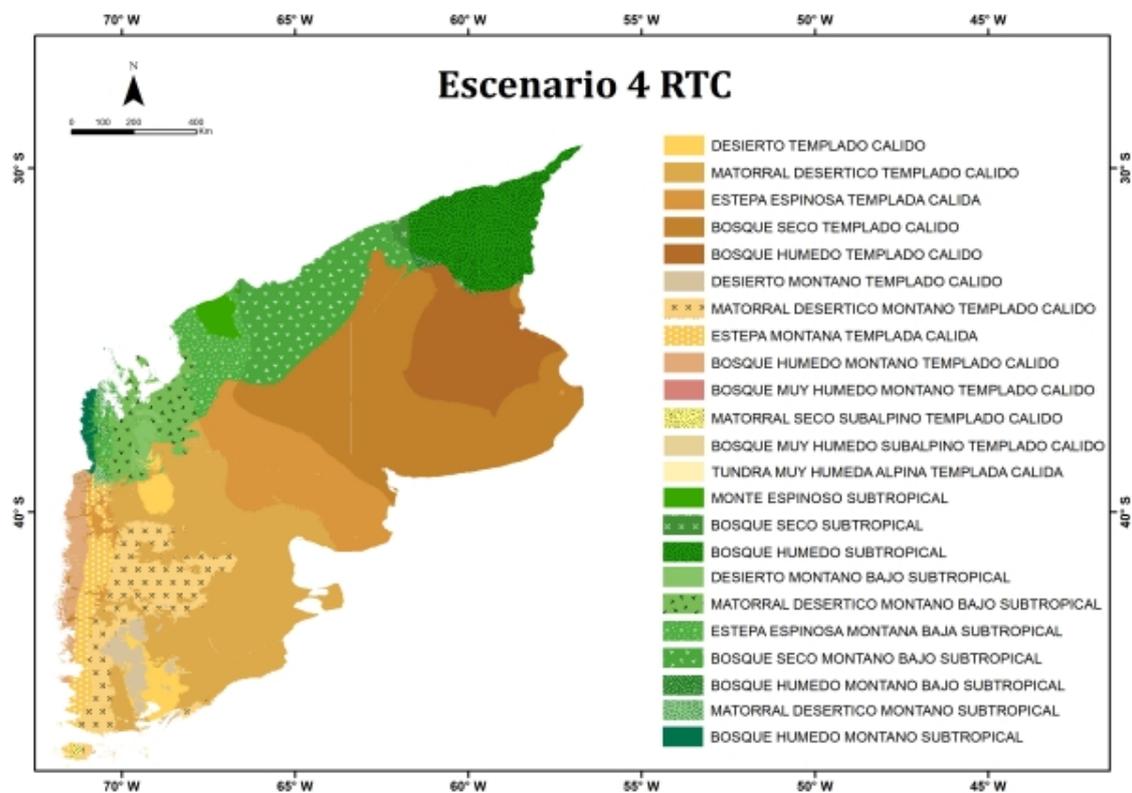


Figura 41 Zonas de vida en el escenario climático e4 (FL-RCP 8.5) de la RTC.

La Región Templada Fría (RTF), al igual que las restantes regiones latitudinales experimentó un notable desplazamiento hacia el sur del territorio, en este caso cubriendo por completo la zona que en el escenario actual corresponde a la RAB. No se observaron cambios significativos a nivel de cantidad y tipo de zonas de vida de la región en los distintos escenarios (Fig. 42, 43, 44, 45, 46)

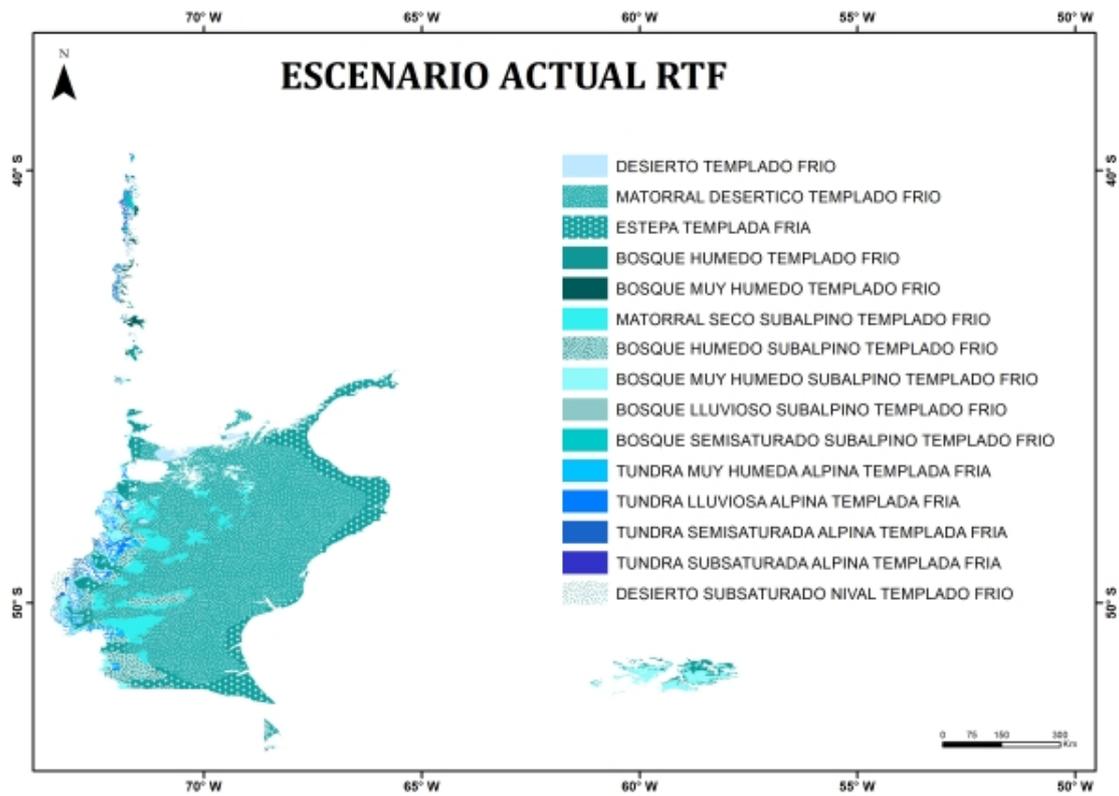


Figura 42. Zonas de vida en el escenario climático actual de la RTF.

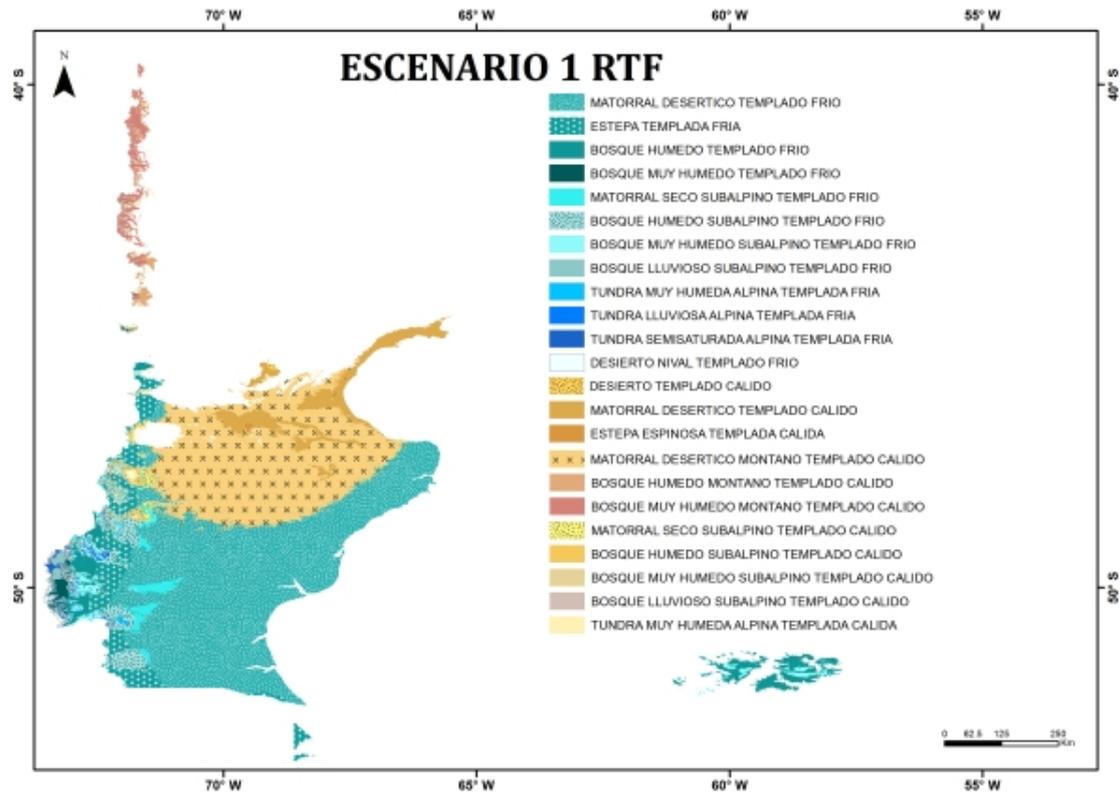


Figura 43. Zonas de vida en el escenario climático e1 (FC-RCP 4.5) de la RTF.

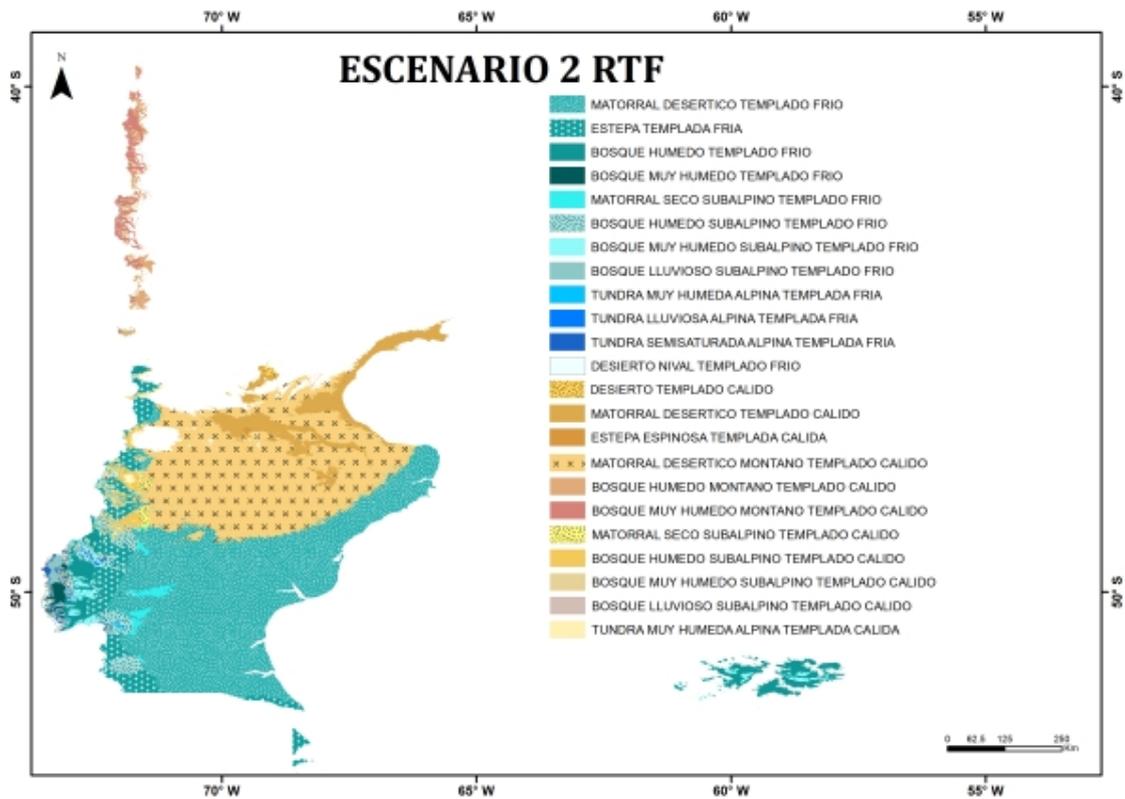


Figura 44. Zonas de vida en el escenario climático e2 (FC-RCP 8.5) de la RTF.

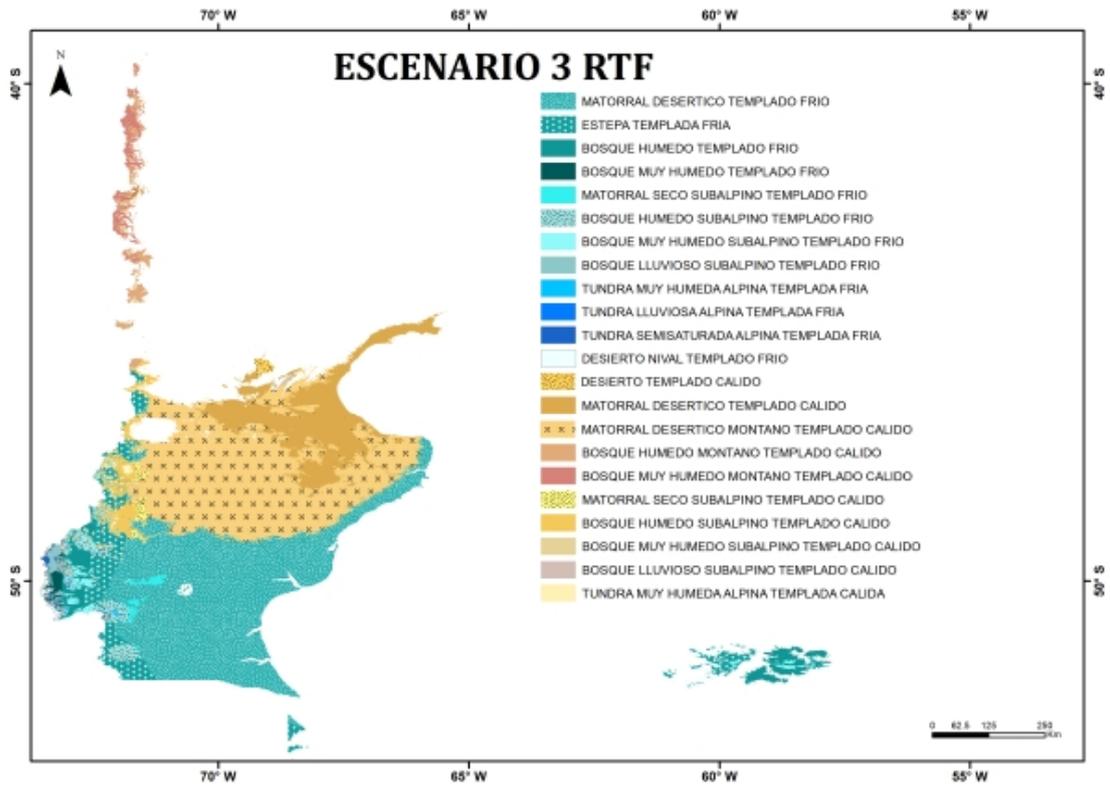


Figura 45. Zonas de vida en el escenario climático e3 (FL-RCP 4.5) de la RTF.

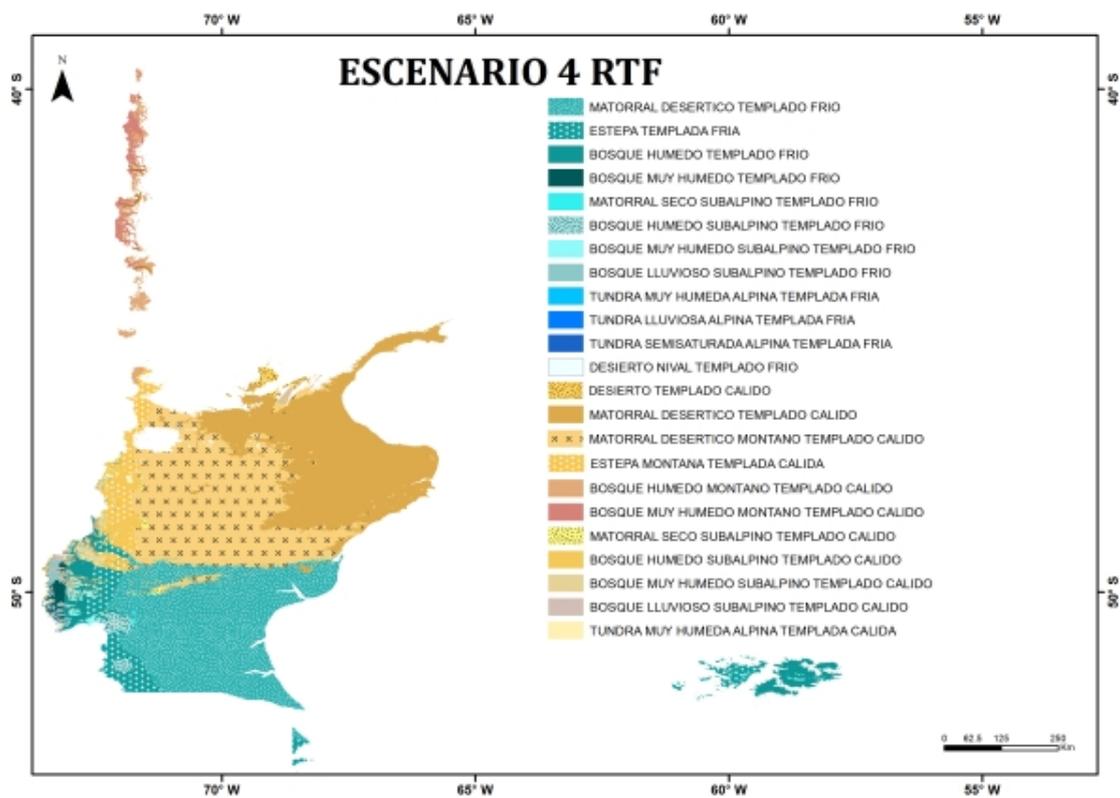


Figura 46. Zonas de vida en el escenario climático e4 (FL-RCP 8.5) de la RTF.

Bajo las proyecciones de cambio climático establecidas para Argentina, la Región Antiboreal (RAB) desaparece y la zona que la representa en el escenario actual se transforma en templada cálida (Fig. 47, 48, 49, 50, 51).

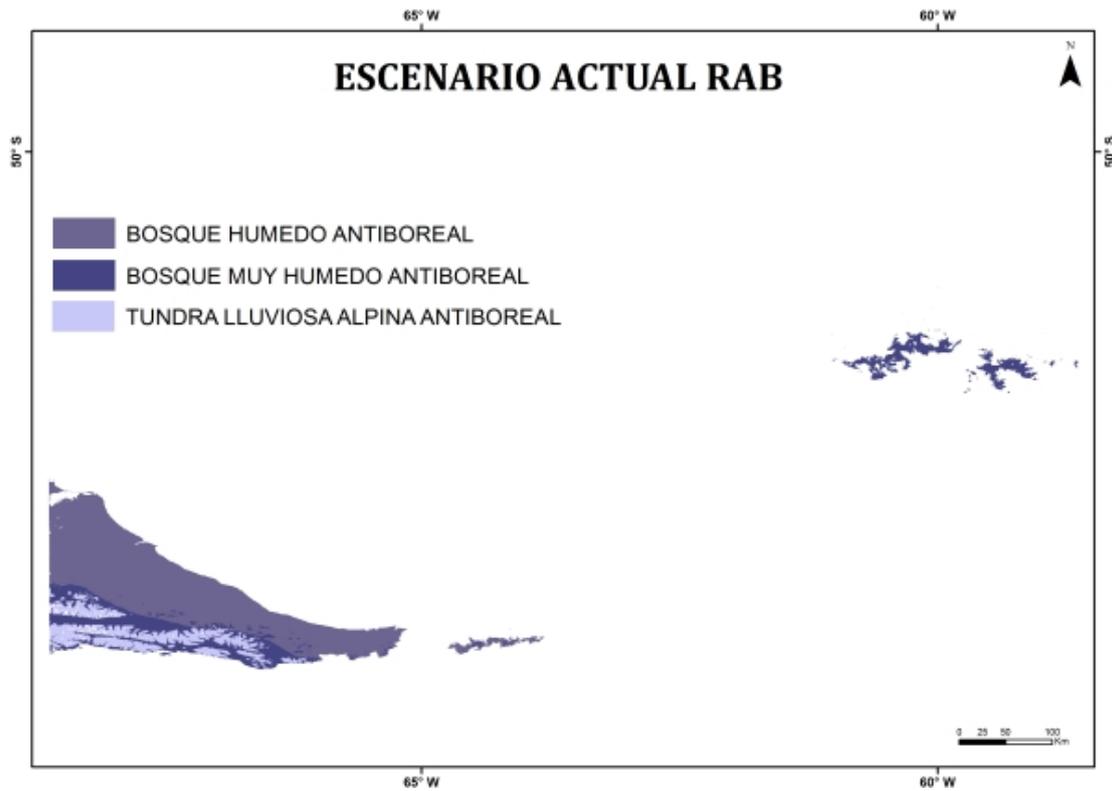


Figura 47. Zonas de vida en el escenario climático actual de la RAB.

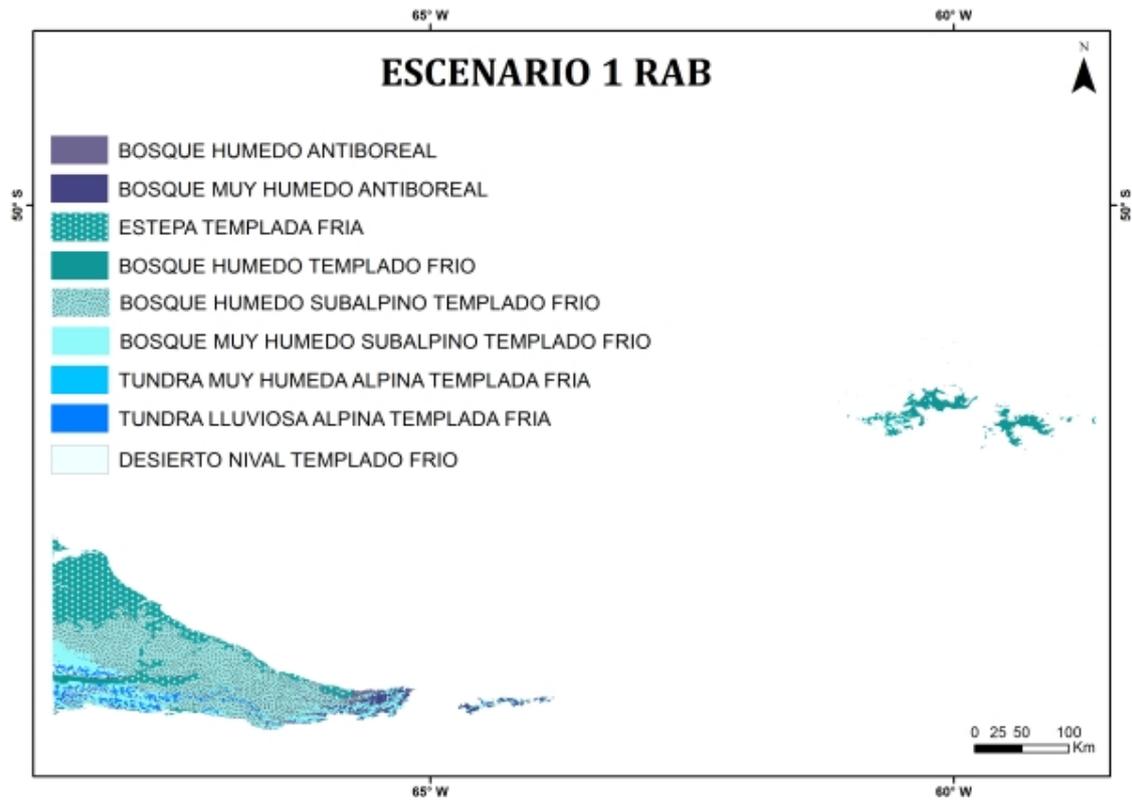


Figura 48. Zonas de vida en el escenario climático e1 (FC-RCP 4.5) de la RAB.

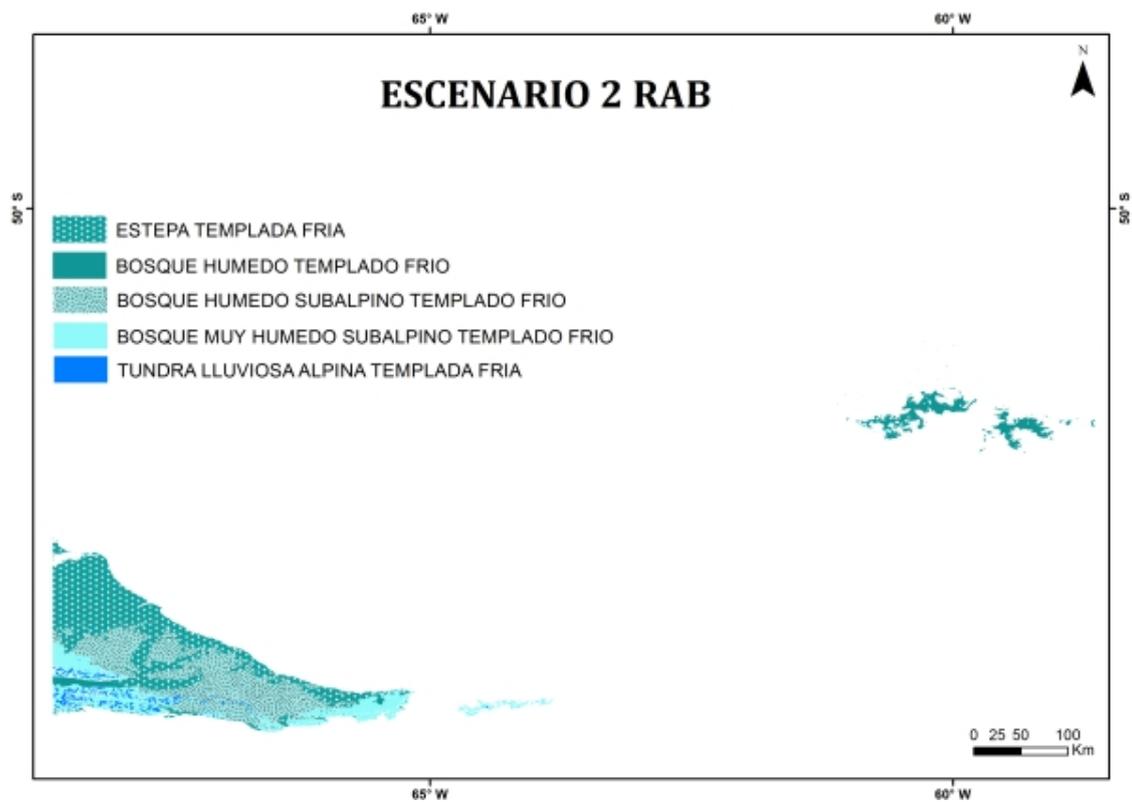


Figura 49. Zonas de vida en el escenario climático e2 (FC-RCP 8.5) de la RAB.

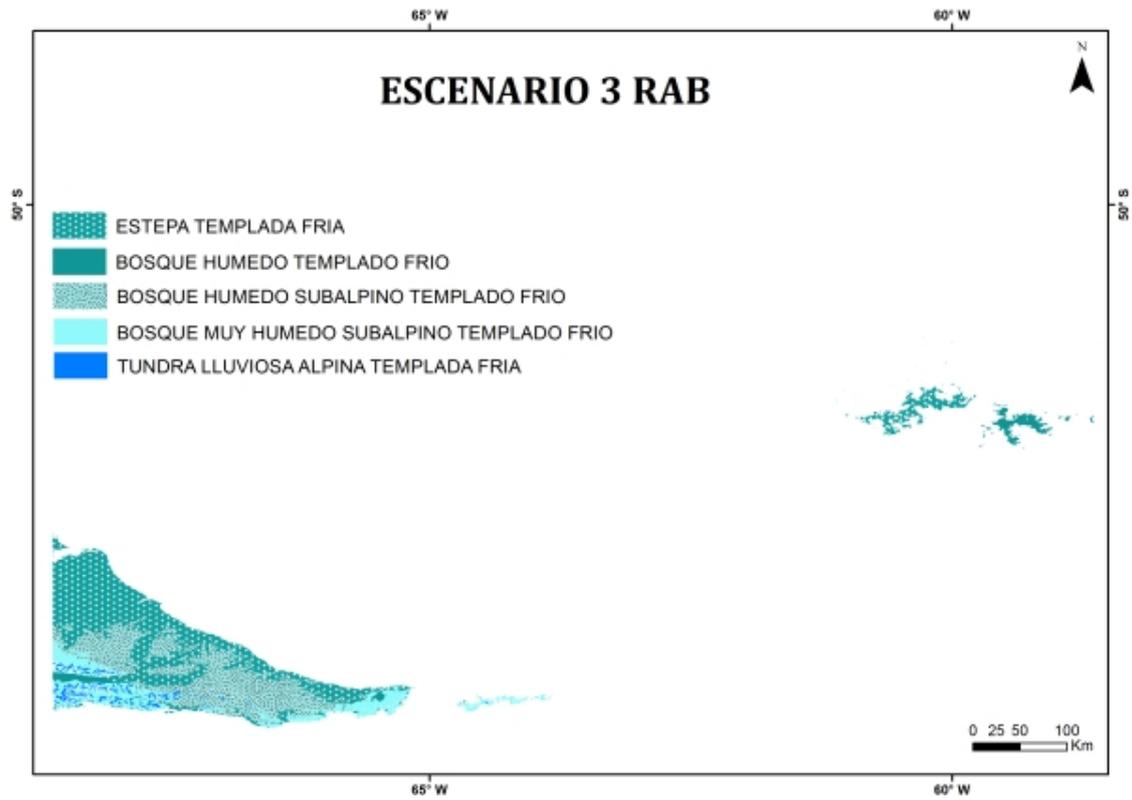


Figura 50. Zonas de vida en el escenario climático e3 (FL-RCP 4.5) de la RAB.

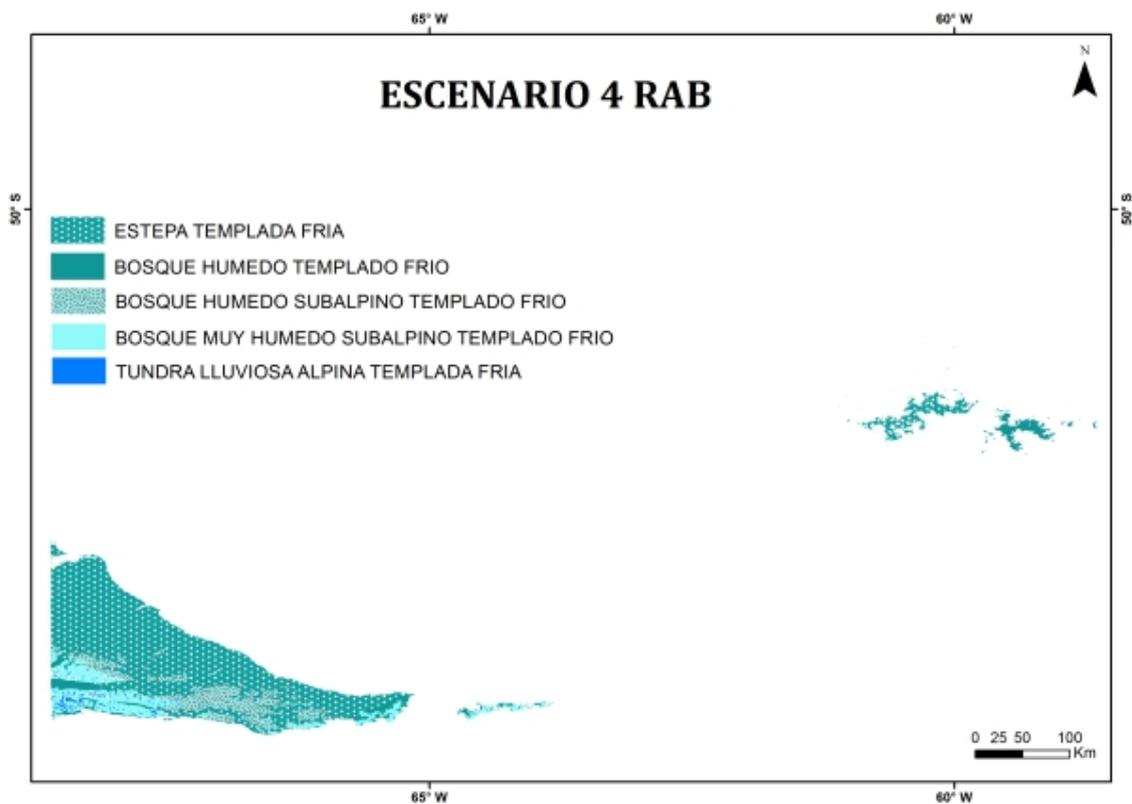


Figura 51 Zonas de vida en el escenario climático e4 (FL-RCP 8.5) de la RAB.

4.3.2 Zonas de vida y zonas ecológicas

Si bien las ecorregiones presentaron en general características fisonómicas homogéneas, en algunas ecorregiones se adoptó una denominación consistente en la combinación de más de una unidad fisonómica debido a que ninguna de ellas resultó claramente predominante (Tabla 7).

Tabla 7. Denominación fisonómica adoptada en este trabajo para las ecorregiones. Altos Andes (AA), Bosques Patagónicos (BP), Chaco Húmedo (CH), Chaco Seco (CS), Campos y Malezales (CyM), Delta e Islas del Río Paraná (DeIRP), Espinal (E), Esteros del Ibera (EdI), Estepa Patagónica (EP), Monte de Llanuras y Mesetas (MLLyM), Monte de Sierras y Bolsones (MSyB), Pampa (Pa), Puna (Pu), Selva Paranaense (SP), Selva de Yungas (SY).

EC	Burkart <i>et al.</i> 1999	Morello <i>et al.</i> 2012	Oyarzabal <i>et al.</i> 2018	Denominación en este trabajo
BP	Bosque semideciduo	Bosque semideciduo	Bosque semideciduo	Bosque semideciduo
EP	Estepa arbustiva baja; Estepa herbácea; Pastizal	Arbustos bajos; Estepa herbácea; Pastizal xerófilo	Estepa arbustivo graminosa	Estepa arbustiva
MLLyM	Estepa arbustiva	Estepa arbustiva	Estepa arbustiva	Estepa arbustiva
AA	Estepa graminosa o arbustiva, baja y rala	Estepa graminosa; Estepa de caméfitas; Pastizal de altura	Estepa graminosa/arbustiva	Estepa arbustiva y graminosa
Pu	Estepa arbustiva	Pastizal bajo	Estepa arbustiva	Estepa arbustiva
MSyB	Estepa arbustiva alta	Estepa arbustiva; Bosque bajo abierto caducifolio; Matorral de arbustos bajos; Pastizal	Estepa arbustiva	Estepa arbustiva

SY	Selva pedemontana; Selva montana; Bosque montano; Pastizal de altura	Selva pedemontana; Selva montana o perennifolia; Bosque montano o de neblina; Pastizal montano	Selva pedemontana; Selva montana; Bosque montano; Pastizal	Selva pedemontana; Selva montana; Bosque montano
CS	Bosque xerófilo; Bosque serrano; Sabana; Pastizal	Bosque xerófilo	Bosque de xerofitas	Bosque seco
E	Bosques xerófilos bajos; Sabana; Pastizal	Bosques xerófilos bajos; Sabana; Pastizal	Bosque de esclerofitas; Pastizal	Bosque seco
CH	Bosques altos; Esteros y cañadas; Pastizal; Sabana; Pajonal	Humedales; Bosques altos y Selvas de ribera	Bosques de xerofitas; Humedal; Sabana	Bosque húmedo y sabanas
EdI	Vegetación palustre; Embalsados; Pajonal en cañadas y bañados; Isletas de bosque	Vegetación palustre; Pastizal; Pajonal	Sabana; Humedal	Humedales
CyM	Pastizal; Pajonal; Isletas de bosque	Pastizal; Matorral abierto; Bosque ribereño	Pastizal; Sabana	Pastizal y sabana
SP	Selva	Bosque semideciduo	Selva semidecidua	Selva
DeIRP	Pajonal; Pastizal; Bosques y arbustales ribereños; Vegetación hidrófila y acuática	Bosques fluviales; Pastizales; Canutillares; Camalotales; Pajonales	Bosque ribereño; Humedales	Humedales
Pa	Pastizal	Estepa o Pseudoestepa de gramíneas; Bosques ribereños	Pastizal	Pastizal

Las diferencias de ICB indicaron que algunas ecorregiones compartieron baja proporción del área de sus zonas de vida con otras ecorregiones, mientras que otras presentaron mayores proporciones de su área ocupada por zonas de vida compartidas con otras ecorregiones. Además, los intervalos de confianza de ICB variaron marcadamente entre ecorregiones indicando que en algunas de ellas la incertidumbre de la información climática local afectó en mayor o menor medida la estimación del ICB. Entre las ecorregiones de menor ICB se encontraron Campos y Malezales, Delta e islas del Río Paraná y Esteros del Iberá, mientras que Chaco Seco y Estepa Patagónica presentaron ICB mayores de 0,7 y reducidos intervalos de confianza en comparación con otras ecorregiones. Ecorregiones como Selva Paranaense, Chaco Húmedo, Yungas y Pampa presentaron amplios intervalos de confianza indicando que el área ocupada por diferentes zonas de vida dentro de cada una de ellas se vio claramente afectada por la incertidumbre de los datos climáticos locales. Los intervalos de confianza fueron apreciablemente estrechos en ecorregiones cuyos límites naturales se asociaron con niveles de altitud como Altos Andes, Puna y Bosques Patagónicos (Fig.52).

Las ecorregiones con mayor diversidad de zonas de vida (IDB) y menor amplitud de los intervalos de confianza fueron aquellas con mayores variaciones altitudinales en el Noroeste y en la Patagonia. La menor diversidad climática y mayor amplitud de los intervalos de confianza correspondió a ecorregiones del Noreste, con menores contrastes altitudinales (Fig.53).

Las ecorregiones tendieron a distribuirse en el espacio definido por los dos primeros ejes del Análisis de Correspondencia marcando un gradiente geográfico-climático en que las regiones subtropicales, templado cálidas y húmedas del Noreste y Centro tendieron a localizarse hacia el extremo positivo del primer eje. Desde ese extremo hacia el extremo negativo del primer eje se distribuyeron las ecorregiones en una secuencia correspondiente a un gradiente NE-NO. Además, desde el extremo positivo del primer eje hacia los extremos negativos del primero y segundo eje se observó un gradiente desde las regiones este, centro y patagónica. A lo largo de esos gradientes geográfico-climáticos tendieron a diferenciarse las fisonomías representadas por las ecorregiones. Las regiones del este y noreste de Argentina, en el extremo positivo del primer eje, representaron un gradiente en el que aumentó la temperatura hacia los valores positivos del segundo eje, y valores máximos de

precipitación en una posición intermedia de esas secuencias de ecorregiones. Ese ordenamiento coincidió con una separación de fisonomías de pastizales, sabanas y selvas con la localización de las sabanas y bosques del Chaco Húmedo con los valores más altos en el segundo eje. Por otra parte, en el gradiente NE-NO, hacia el extremo positivo del segundo eje, la secuencia de ecorregiones representó una variación climática compleja con situaciones de alta temperatura media y bajas precipitaciones en el Chaco Seco y el pedemonte de las Yungas, y bajas temperaturas y precipitaciones extremadamente bajas en la Puna y Altos Andes. En posiciones intermedias se encontraron situaciones de temperaturas moderadas y alta precipitación en las selvas y bosques montanos de las Yungas. La variación fisonómica abarcó desde bosques y sabanas del Chaco Húmedo, bosques de xerofitas del Chaco Seco, selvas pedemontanas, selvas y bosques montanos, estepas arbustivas altas del Monte de Sierras y Bolsones, y en el extremo, estepas arbustivas bajas y estepas de gramíneas de la Puna y los Altos Andes. Finalmente, la variación geográfica desde la región central hacia el SO de la Patagonia representó un gradiente de disminución de la temperatura en todo su rango, mientras que la precipitación registró valores mínimos en posiciones intermedias y un máximo en el extremo SO. Abarcó una diferenciación de fisonomías desde los pastizales pampeanos, bosques de xerofitas del espinal, estepas arbustivas altas del monte, estepas arbustivas bajas y pastizales de la estepa arbustivas bajas y estepas gramíneas de la EP y los bosques templados caducifolios de los BP templado fríos (Fig. 54).

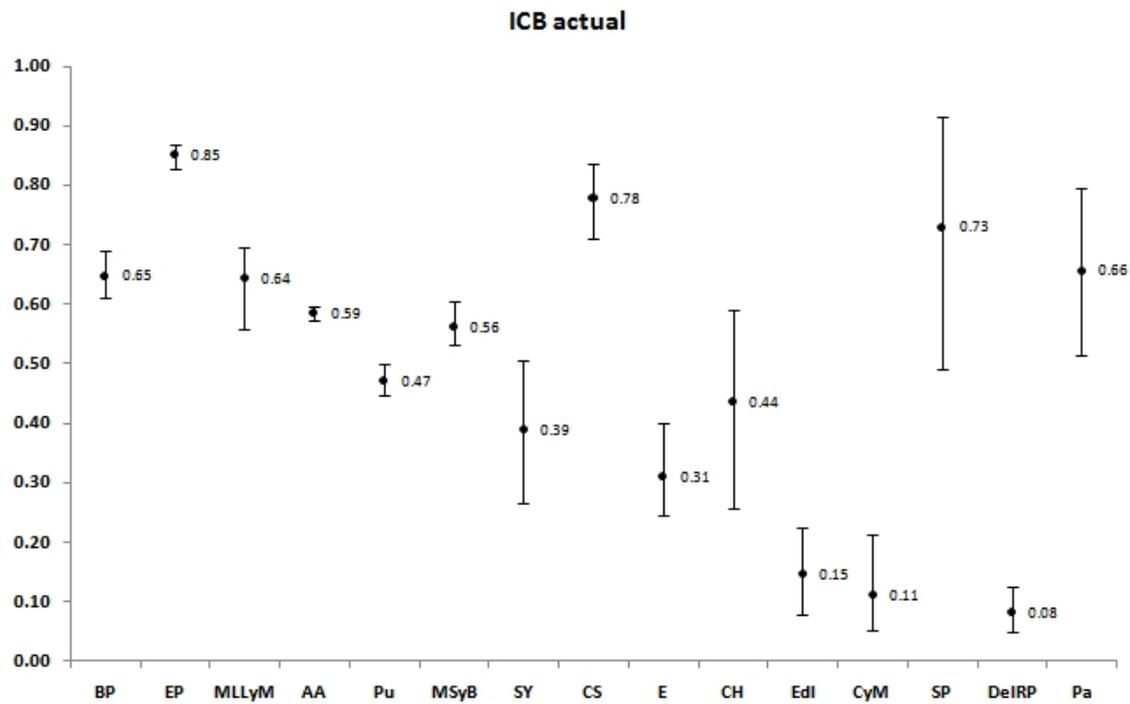


Figura 52. Índice de correspondencia bioclimática actual. Se observan los valores medios (ICBm) y sus límites de confianza superior e inferior.

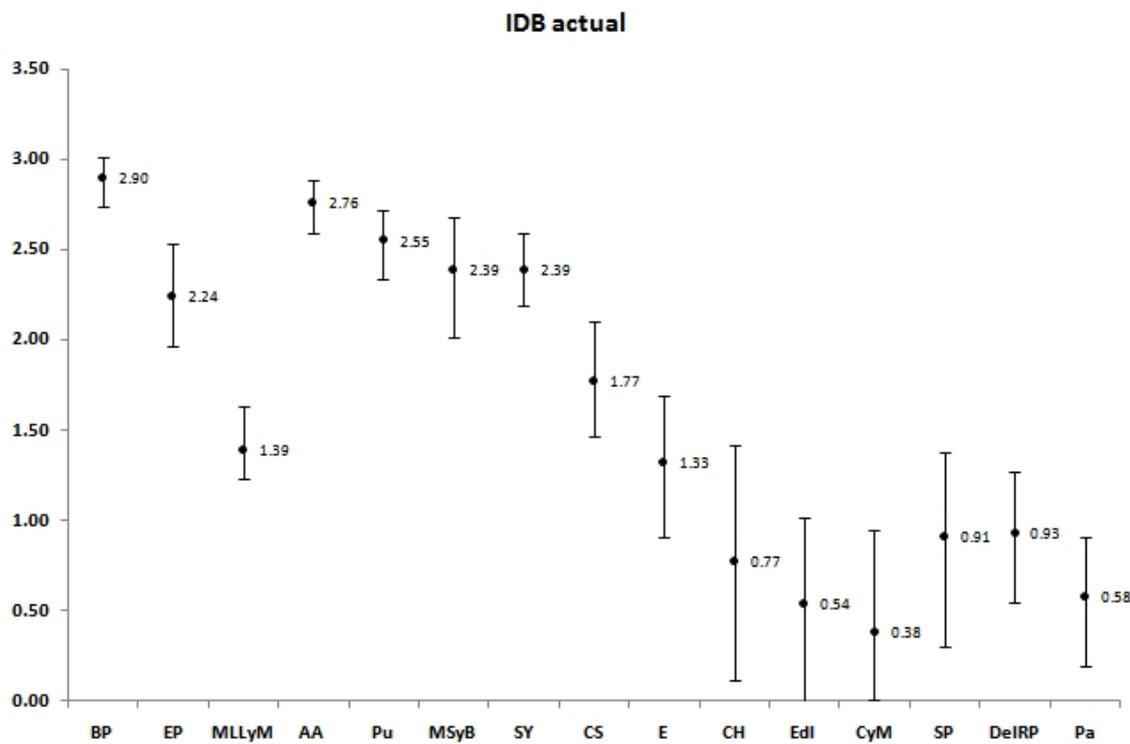


Figura 53. Índice de diversidad bioclimática actual. Se observan los valores medios (IDBm) y sus límites de confianza superior e inferior.

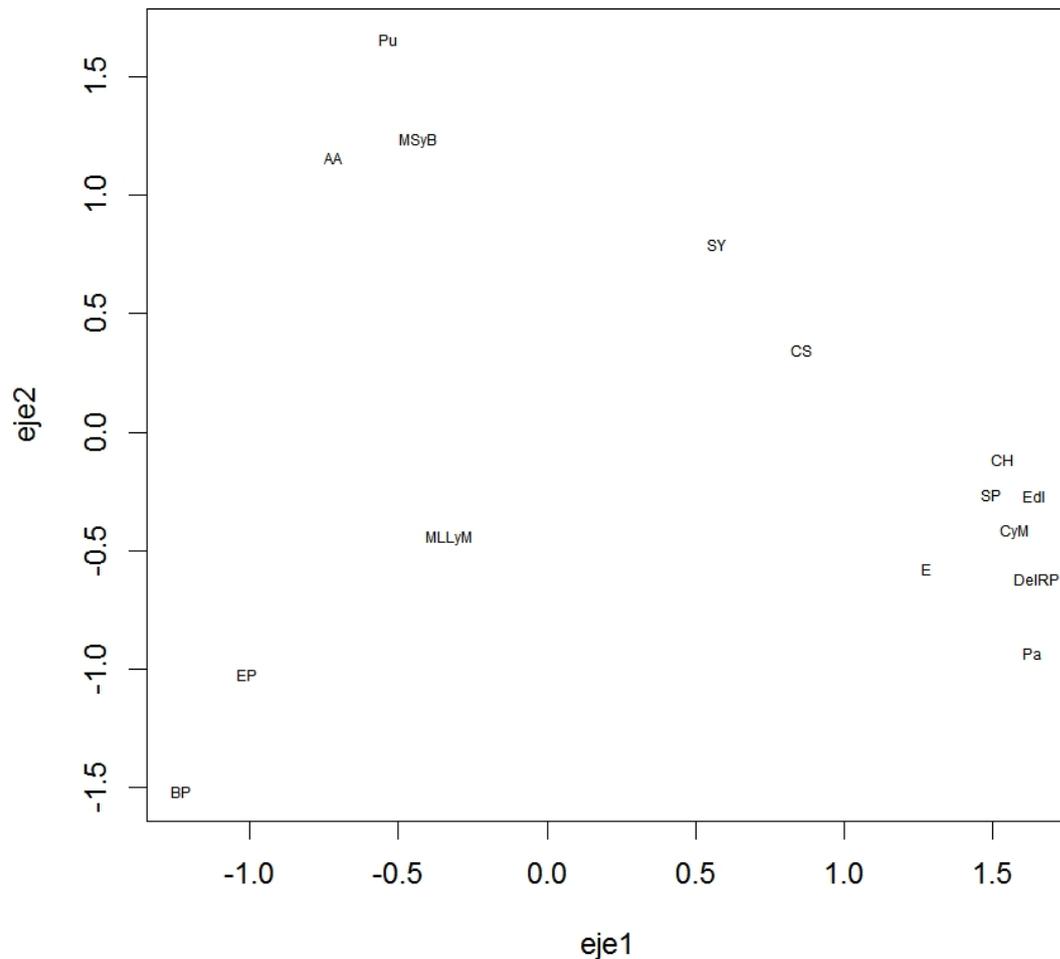


Figura 54. Análisis de correspondência (AC) actual de las Ecorregiones en función de sus características bioclimáticas

El efecto de los cambios climáticos previstos por los modelos globales sobre las características climáticas de las ecorregiones se observó tanto en los ICB, como en los IDB y en los AC. El ICB indicó el principal cambio en la correspondencia entre zonas de vida y ecorregiones en el escenario 1, donde se observó que el mismo alcanzó valores inferiores al límite de confianza inferior como en la ecorregión Selva Paranaense. Un cambio similar se observó la Puna, Altos Andes y Monte de Sierras y Bolsones, aunque en los dos últimos casos el ICB resultó mayor. Otras ecorregiones como las Yungas y Estepa Patagónica exhibieron una reducción del índice, aunque se mantuvo dentro del intervalo de confianza. Estos cambios indicaron que para esas ecorregiones los cambios climáticos previstos en los modelos provocaron corrimientos de las zonas de vida que las caracterizaban. Esto aumentó la superposición climática con otras ecorregiones excepto en Altos Andes y Monte de Sierras y Bolsones, en las que el

corrimiento de las zonas de vida disminuyó la superposición climática con otras ecorregiones. En los escenarios 2 y 3 estas tendencias se mantuvieron o incrementaron. Los cambios más sustanciales se observaron en el escenario 4 en el que todas las tendencias del escenario 1 se incrementaron y la reducción del ICB por fuera del intervalo de confianza también se observó en Monte de Llanuras y Mesetas. La tendencia más consistente en los cambios de IDB fue una reducción de esa diversidad climática para Bosques Patagónicos, Puna y Yungas desde el escenario 1 hasta el 4, así como un incremento de la diversidad climática para Delta e Islas del Río Paraná. En el escenario 4, además de esos cambios, se observó una disminución de la diversidad climática en Monte de Sierras y Bolsones y un incremento en Monte de Llanuras y Mesetas, Campos y Malezales y Pampa. En los Análisis de Correspondencia se observó que los escenarios 1 a 3 presentaron tendencias similares. Las ecorregiones del Centro y NE de Argentina experimentaron aumentos en sus posiciones sobre el eje2. Esos corrimientos indicaron que las condiciones climáticas proyectadas para las zonas de vida en la Pampa resultaron semejantes a las que actualmente se presentan en Delta e Islas del Río Paraná, mientras que las condiciones proyectadas de Delta e Islas del Río Paraná se asemejaron a las condiciones actuales de Selva Paranaense. Por otra parte, Selva Paranaense, Campos y Malezales y Esteros del Iberá resultaron similares a las condiciones actuales de Chaco Húmedo. La proyección para Chaco Húmedo y Espinal indicó una tendencia a asemejarse a las condiciones de Chaco Seco. En Yungas se observó una tendencia a incrementar su similitud con Monte de Sierras y Bolsones mientras que Altos Andes tendió a resultar similar a las condiciones actuales de Puna. En el SO de Argentina, los Bosques Patagónicos tendieron a asemejarse a las condiciones actuales de Estepa Patagónica, y Estepa Patagónica a Monte de Llanuras y Mesetas. En el escenario 4 las tendencias descritas se mantuvieron pero los cambios más notables fueron Selva Paranaense, Campos y Malezales, Esteros del Iberá y Chaco Húmedo que siguieron presentando características similares entre ellos, pero muy alejados de sus condiciones actuales. La ecorregión Altos Andes presentó una alta similitud con la situación actual de Puna, mientras que Bosques Patagónicos resultó muy cercano a la situación actual de Estepa Patagónica (Fig. 55 a 66).

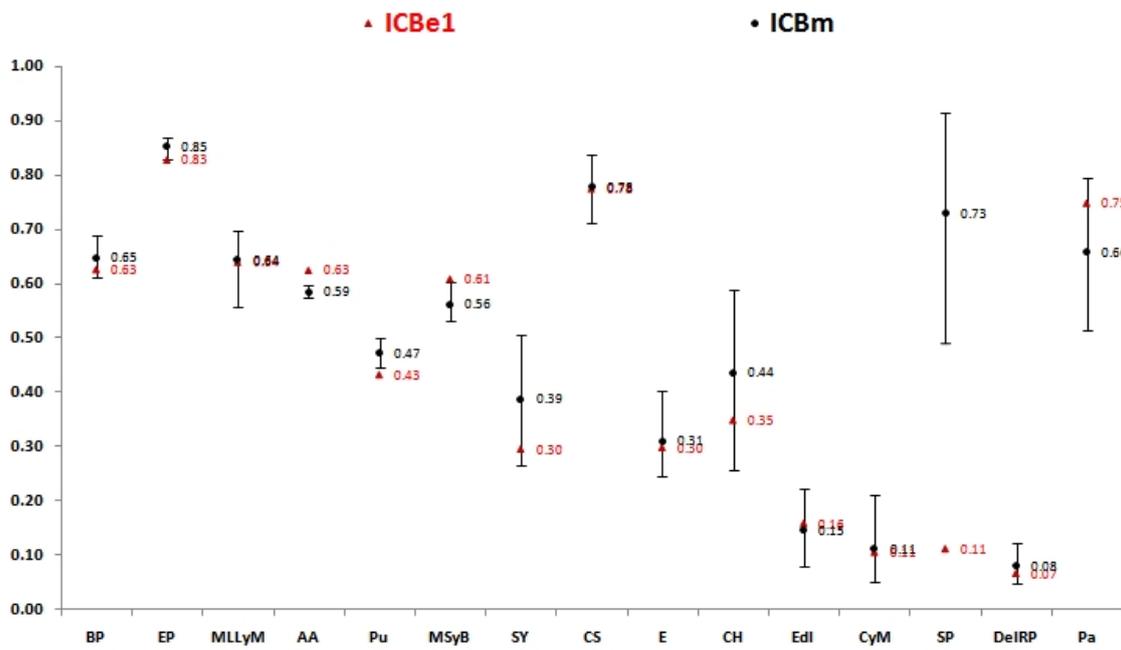


Figura 55. Comparación de ICBm frente al escenario de cambio ICBe1. Se observan también los límites de confianza superior e inferior del ICBm.

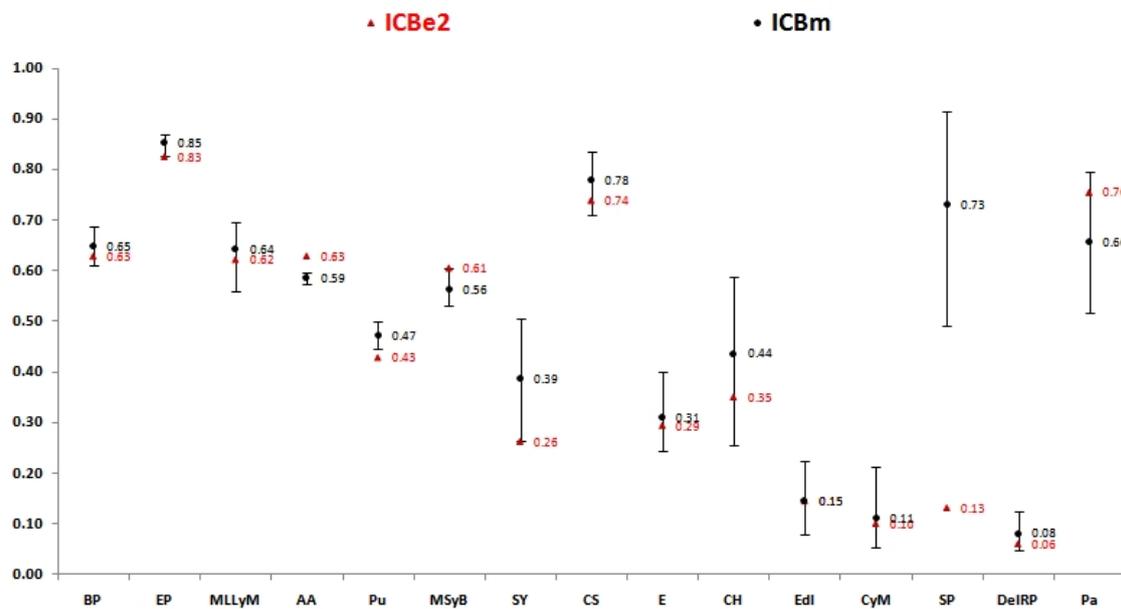


Figura 56. Comparación de ICBm frente al escenario de cambio ICBe2. Se observan también los límites de confianza superior e inferior del ICBm.

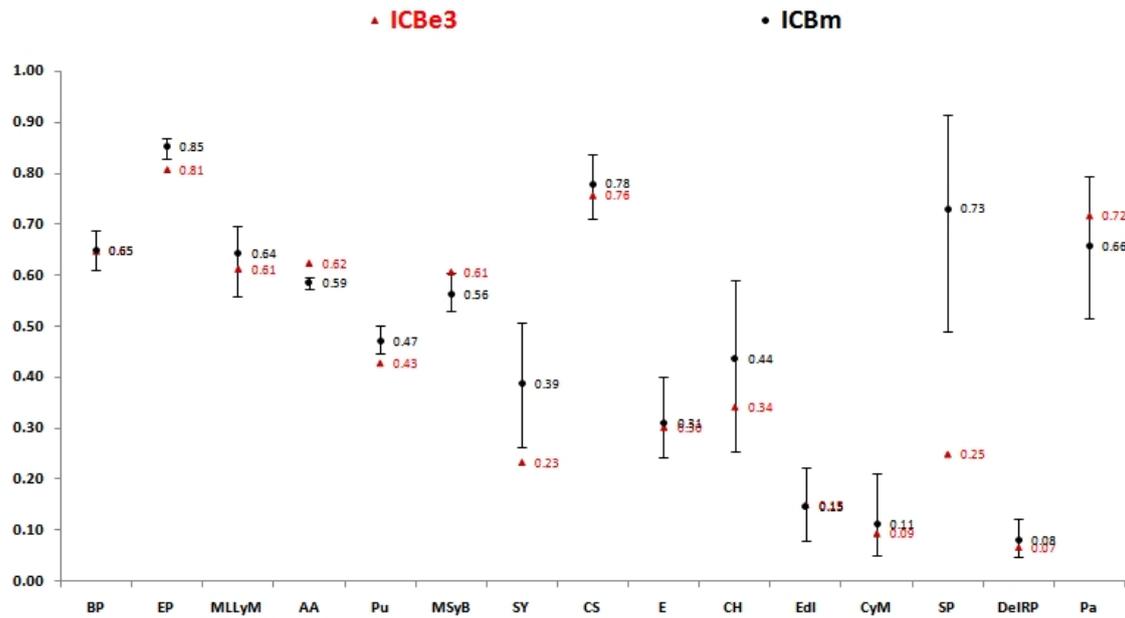


Figura 57. Comparación de ICBm frente al escenario de cambio ICBe3. Se observan también los límites de confianza superior e inferior del ICBm.

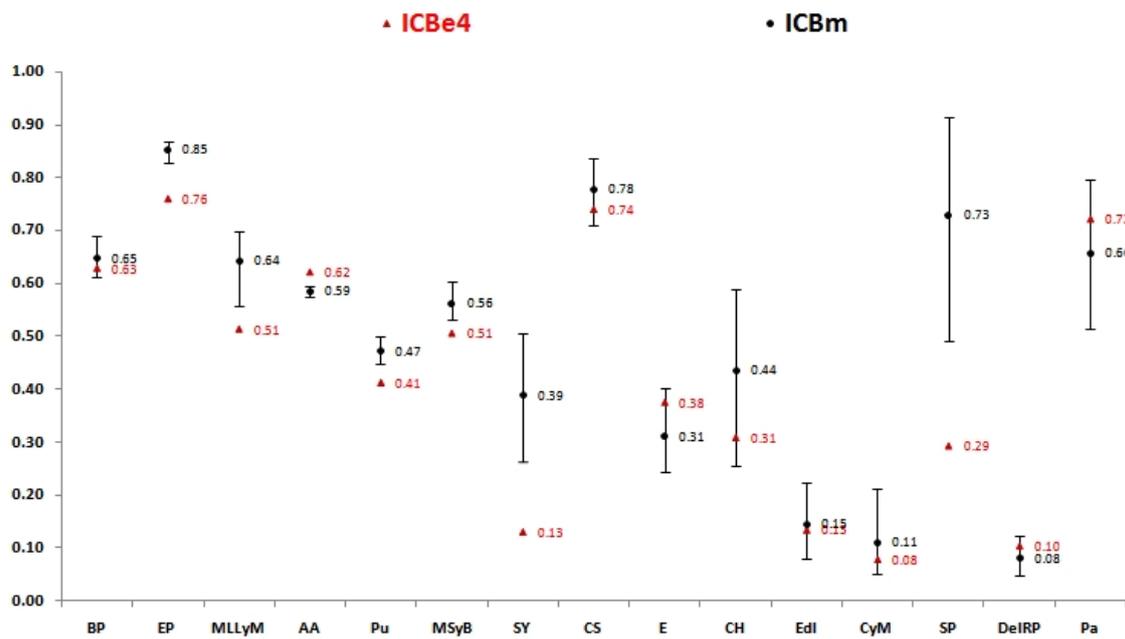


Figura 58. Comparación de ICBm frente al escenario de cambio ICBe4. Se observan también los límites de confianza superior e inferior del ICBm.

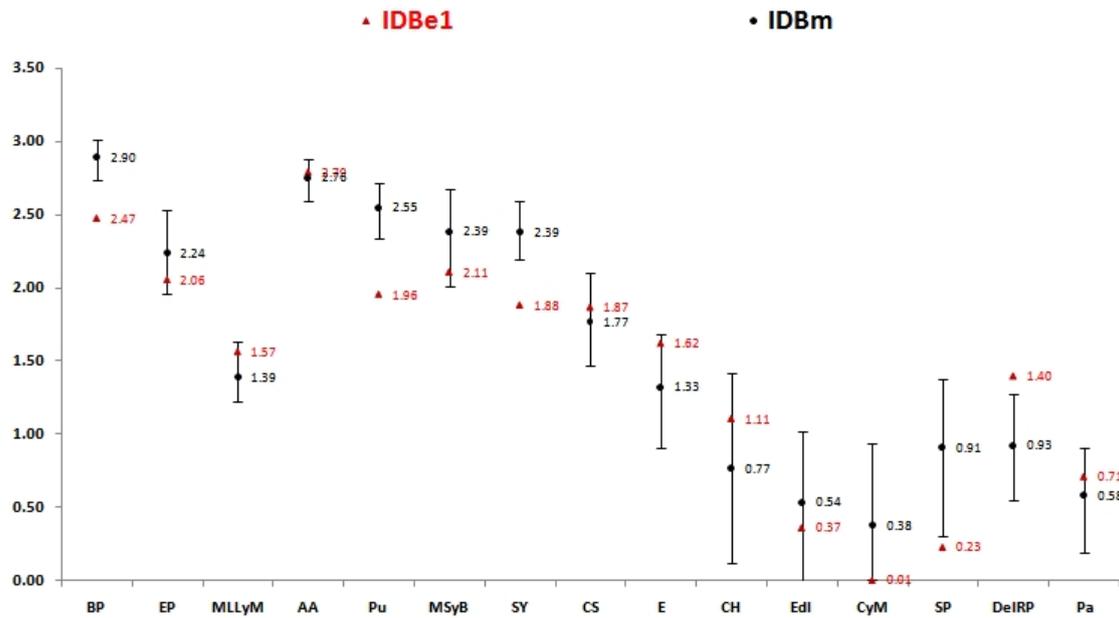


Figura 59. Comparación de IDBm frente al escenario de cambio IDBe1. Se observan también los límites de confianza superior e inferior del IDBm.

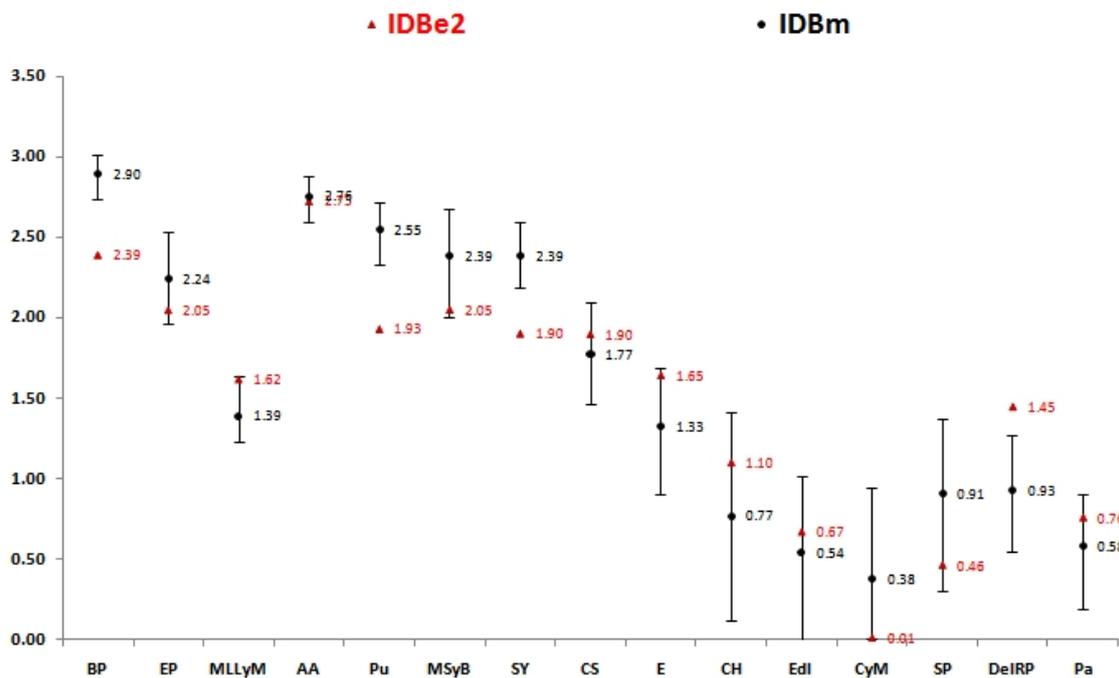


Figura 60. Comparación de IDBm frente al escenario de cambio IDBe2. Se observan también los límites de confianza superior e inferior del IDBm.

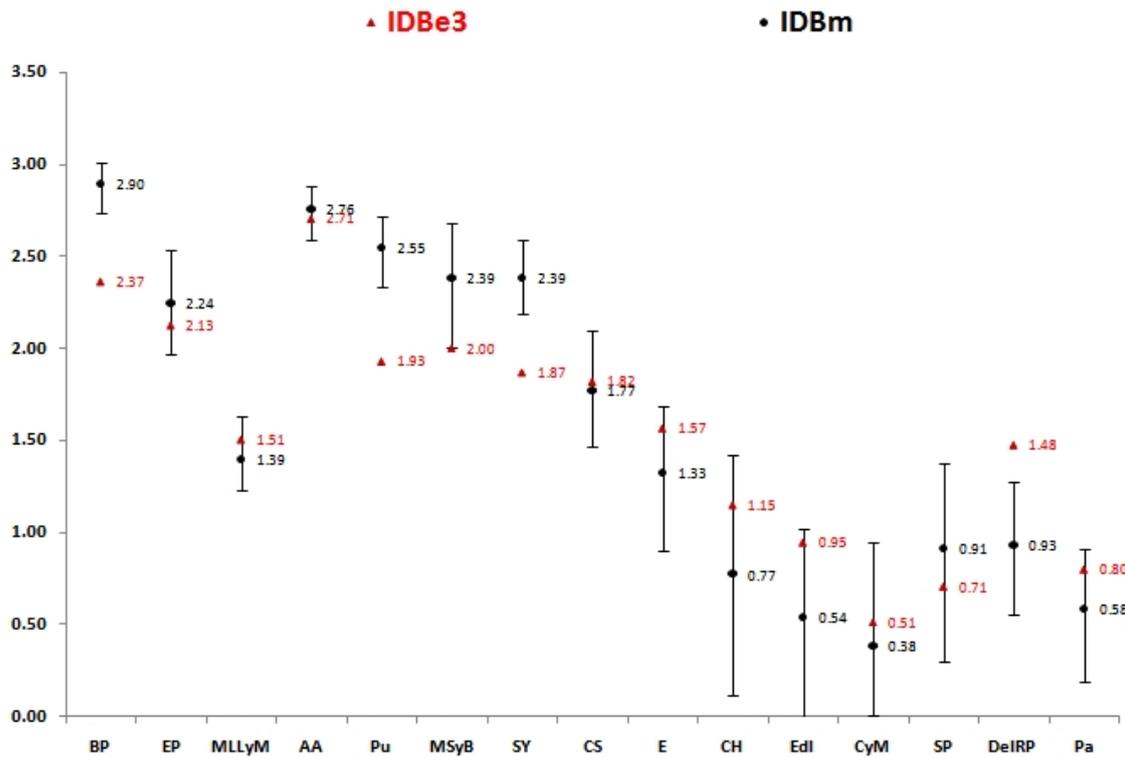


Figura 61. Comparación de IDBm frente al escenario de cambio IDBe3. Se observan también los límites de confianza superior e inferior del IDBm.

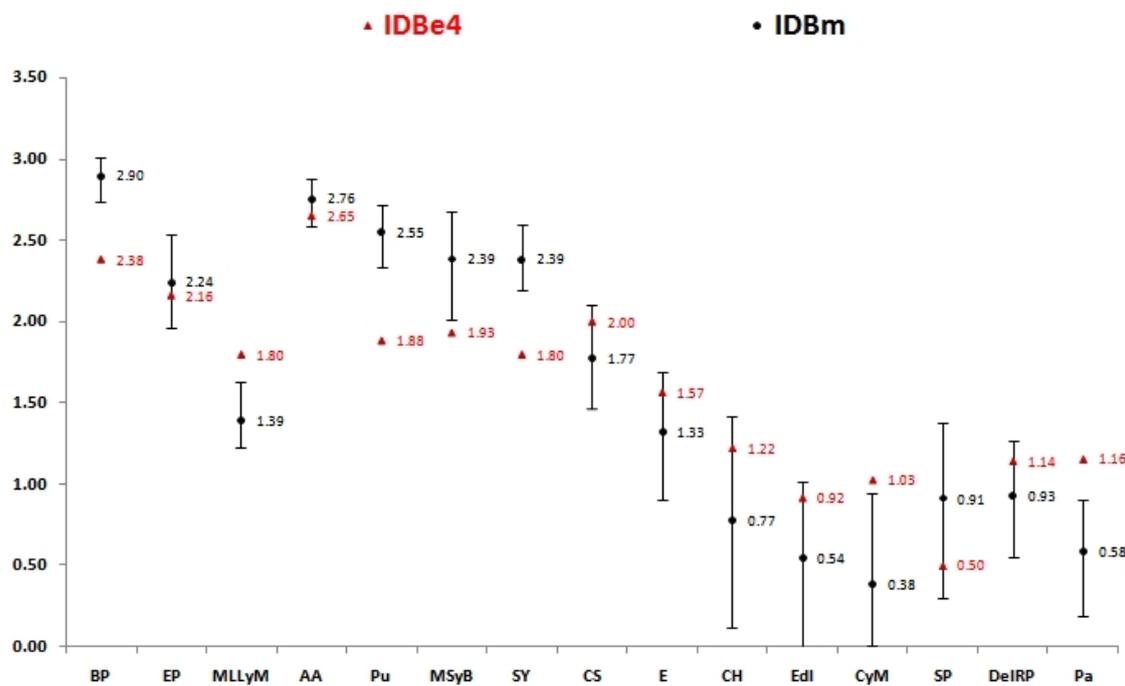


Figura 62. Comparación de IDBm frente al escenario de cambio IDBe4. Se observan también los límites de confianza superior e inferior del IDBm.

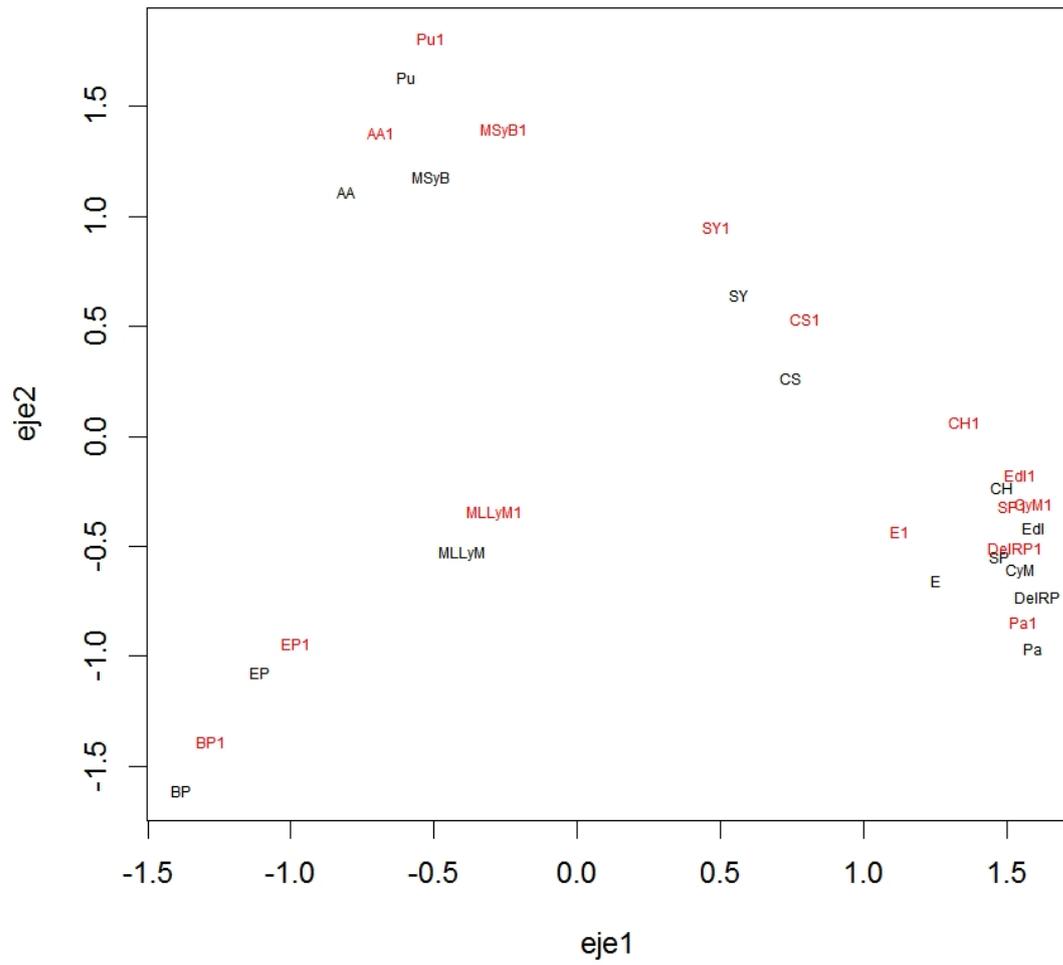


Figura 63 Comparación de AC actual frente al escenario de cambio AC e1

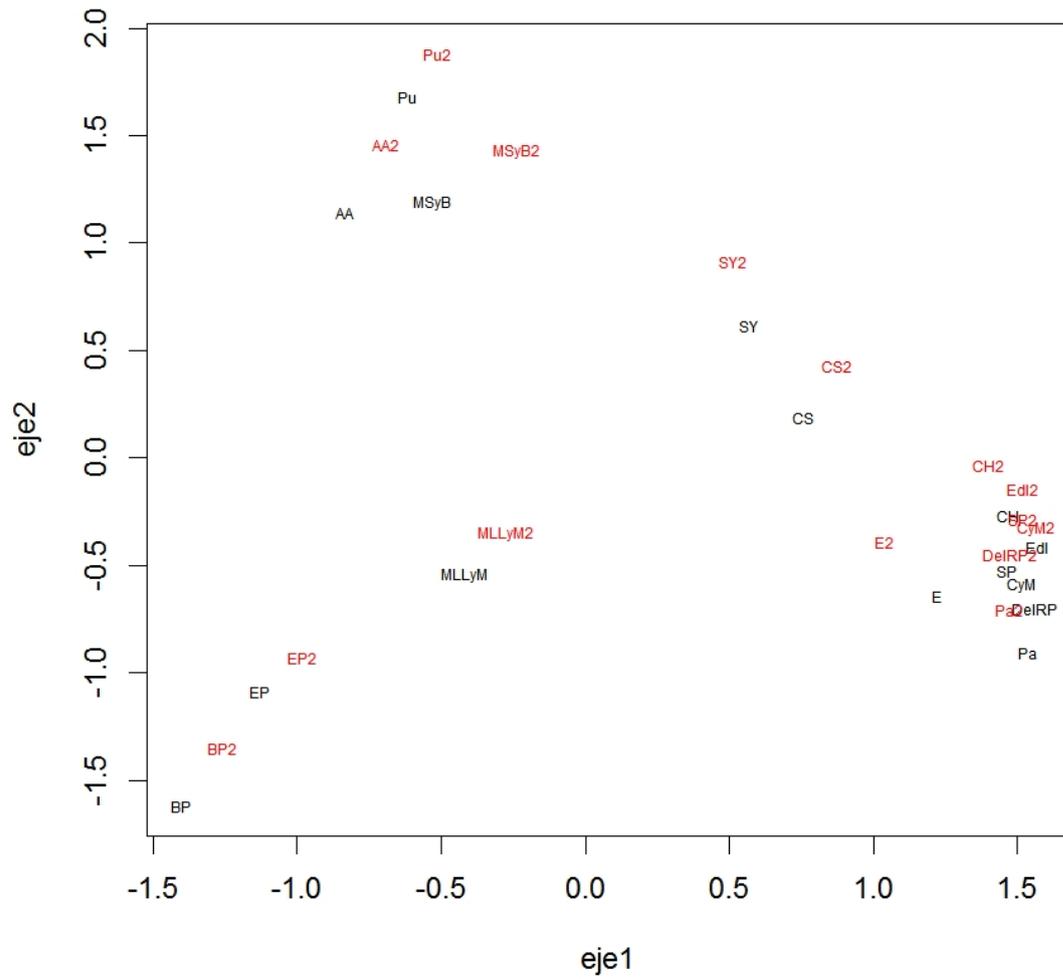


Figura 64. Comparación de AC actual frente al escenario de cambio AC e2

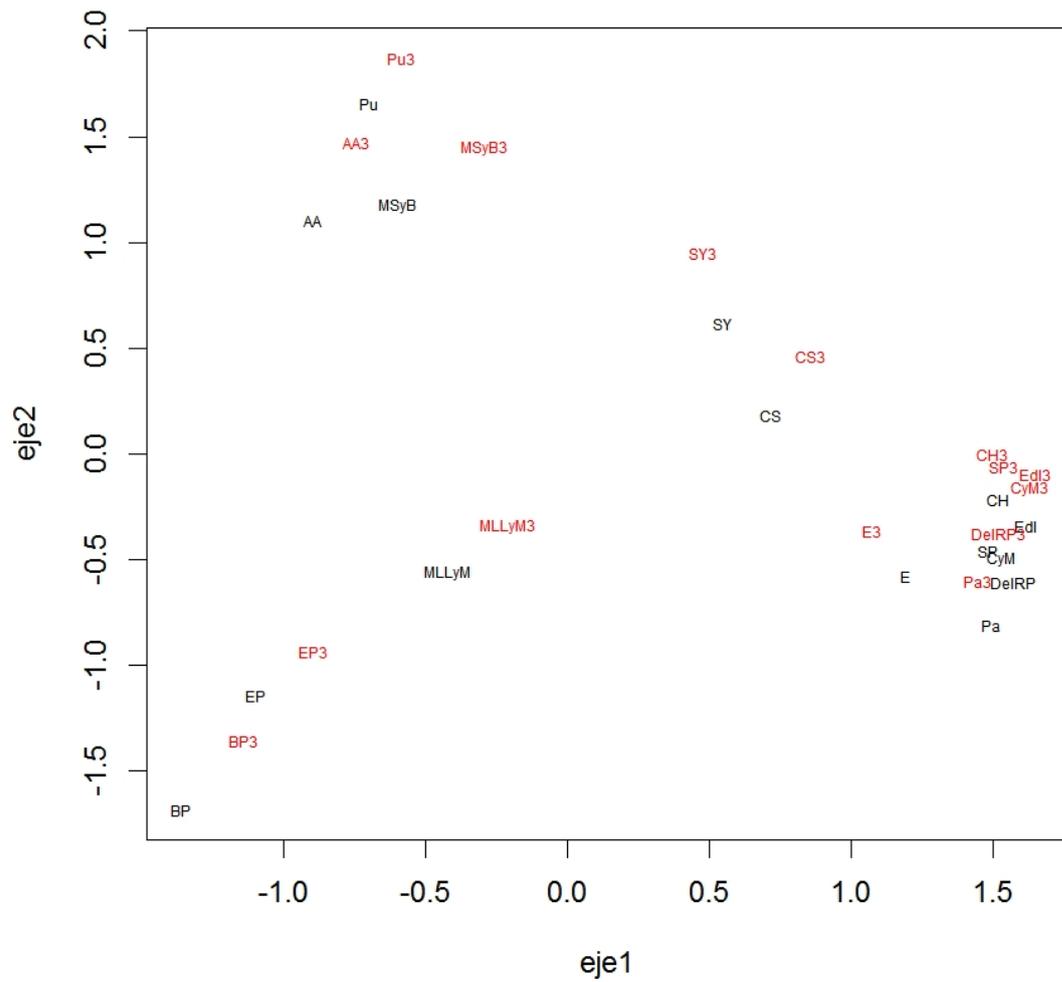


Figura 65 Comparación de AC actual frente al escenario de cambio AC e3

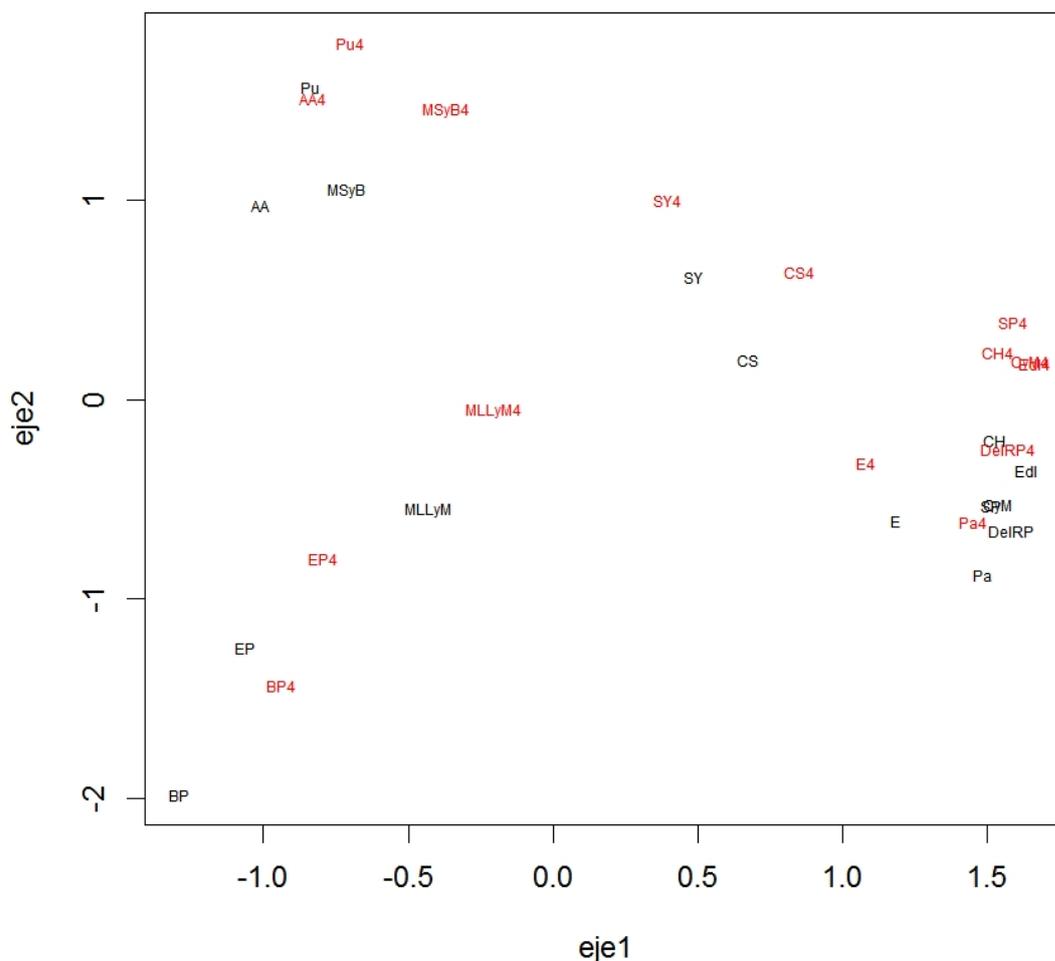


Figura 66. Comparación de AC actual frente al escenario de cambio AC e4

Zonas de vida en el Sistema Nacional de Áreas Protegidas

A partir de la unión de las capas de AP nacionales y provinciales se registraron 305 AP en todo el país. En estas AP las cinco regiones latitudinales del sistema de zonas de vida tuvieron representación (Tabla 8). Las zonas de vida representadas en el SNAP fueron 66 de las 83 que se registran para el país en el escenario actual (Fig. 67; tabla 8). Los porcentajes de cada zona de vida conservada, obtenidos a partir de la relación entre la superficie de zona de vida incluida en AP y la superficie total de la zona de vida, se categorizaron de acuerdo a tres clases: superficie en AP <25%, superficie en AP entre 25 y 50 %, y superficie en AP >50% (Fig. 68 y 69). A nivel de región latitudinal, la Región Latitudinal Tropical presentó el mayor porcentaje de conservación, mientras que las restantes regiones latitudinales no superaron el 10% de superficie conservada. En base a la superficie total de Argentina, ~ 2.792.000 km² basado en el SRC UTM Zona 20 Sur, el porcentaje del país conservado en AP calculado fue de 7%. (Tabla 8).

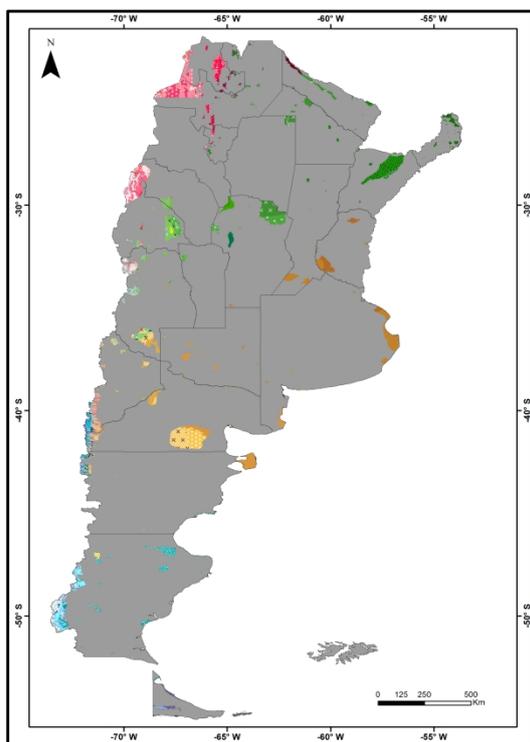
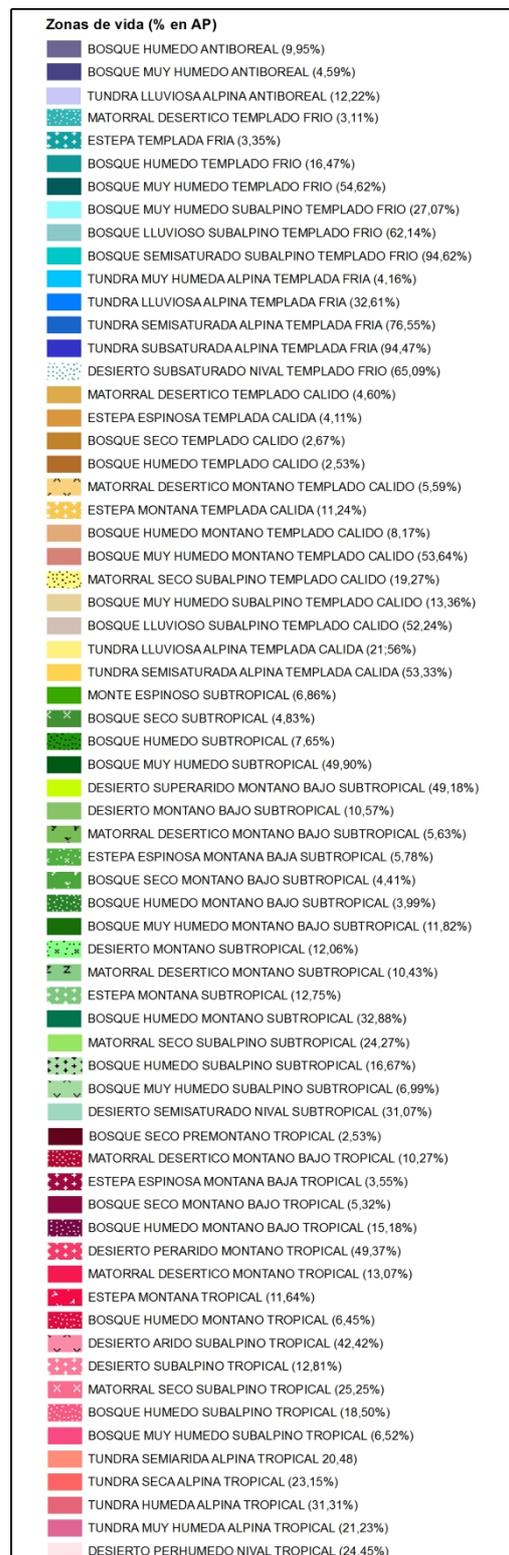


Figura 67. Zonas de vida representadas en el SNAP. A la derecha, la leyenda correspondiente a la figura con el porcentaje de superficie de cada zona de vida contenido en el SNAP.



En algunas zonas de vida el porcentaje de superficie incluido en el SNAP es alto (> 50%), como resultado de una reducida superficie total de la zona de vida, (ej. Tundra Subsaturada Subalpina Templada Fría: superficie en AP 98.576 ha., superficie total de la zona de vida 104.351 ha., porcentaje conservado en el SNAP 94,47%; Bosque Semisaturado Subalpino Templado Frío: superficie en AP 157.747 ha., superficie total de la zona de vida 166.715 ha., porcentaje conservado en el SNAP 94,62%).

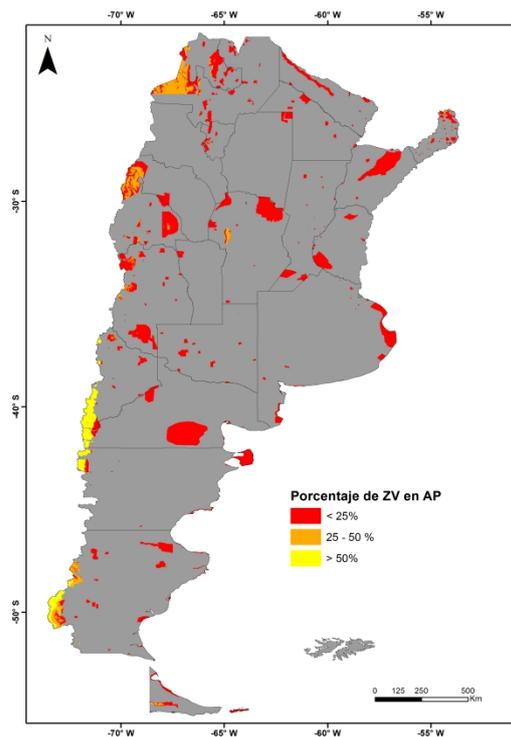


Figura 68 Categorización de las AP de acuerdo al porcentaje de superficie de ZV conservado.

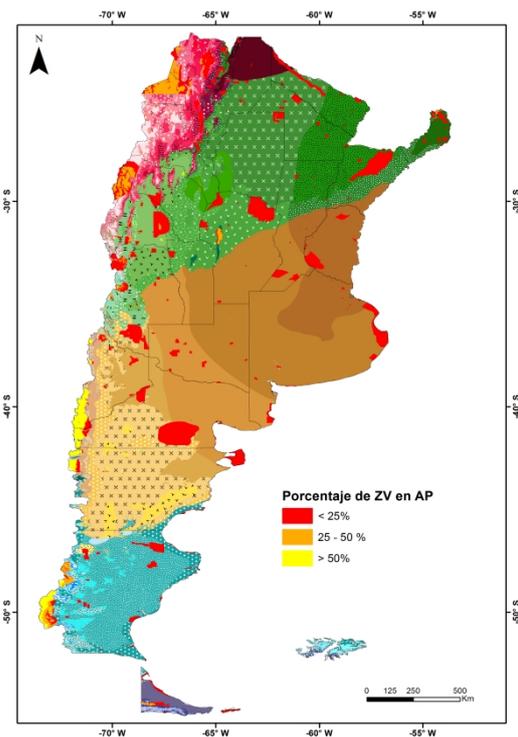


Figura 69. Categorización de las AP de acuerdo al porcentaje de superficie de ZV conservado, sobre el mapa actual de ZV.

Tabla 8. Relación de las zonas de vida (ZV) y las Áreas Protegidas (AP) por región latitudinal. PN= Parque Nacional; PP= Parque Provincial.

Región latitudinal	AP (PN y PP)	Zonas de vida	Zonas de vida en AP	Superficie de ZV en AP (%)
Antiboreal	5	3	3	8.77
Templada Fría	47	15	12	8.91
Templada Cálida	84	16	13	4.56
Subtropical	117	24	19	6.66
Tropical	52	25	19	16.31
Total Argentina	305	83	66	6.94

4.3.3 Zonas de vida y uso de la tierra

A partir de la comparación espacial de los mapas de zonas de vida, actuales y futuras, con el mapa de usos de la tierra, se observó que los ICB de las clases de UT resultaron en su mayoría menores que los alcanzados por las ecorregiones, indicando que los diferentes usos pueden compartir características climáticas reflejadas por las zonas de vida. Los valores más altos de ICB correspondieron a UT de ganadería extensiva de ovinos y caprinos, que abarcaron zonas de vida con condiciones frías y secas en la Estepa Patagónica y en las ecorregiones de Altos Andes y Puna. En segundo lugar se ubicó el UT cultivo de herbáceas, que incluyó las principales áreas agrícolas pampeanas, del chaco y el NOA, indicando que las zonas de vida que presentaron condiciones para esta actividad fueron poco ocupadas por otros usos (Fig. 70).

La diversidad climática, representada por el IDB fue mayor para los usos ganaderos extensivos que abarcaron una amplia variación de zonas de vida y ubicaciones geográficas, y menor para los cultivos herbáceos o leñosos y herbáceos de secano (Fig. 71).

El Análisis de Correspondencia reflejó en el primer eje una variación de usos asociada a un gradiente geográfico que reflejó hacia el extremo positivo del primer eje condiciones frías y secas y hacia el extremo negativo mayores valores de temperatura y precipitación. Hacia el extremo negativo del primer eje se observó una variación en las posiciones respecto del segundo eje en la que los usos localizados hacia valores negativos del segundo eje fueron cultivos de especies leñosas, forestales o no forestales, ubicadas en la Mesopotamia (Fig. 72).

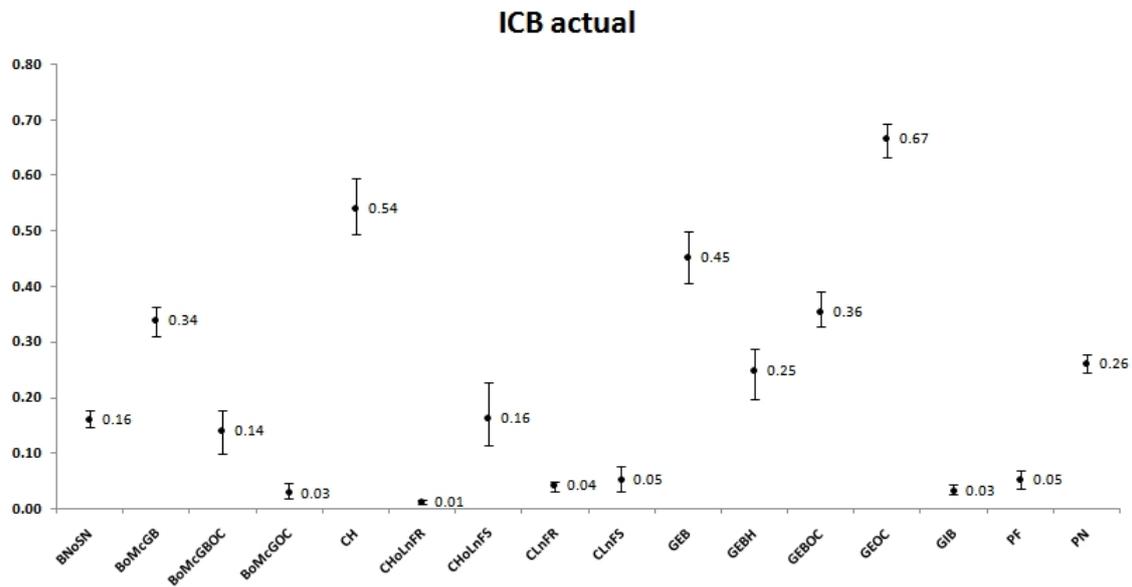


Figura 70. Índice de correspondência bioclimática actual. Se observan los valores medios (ICBm) y sus límites de confianza superior e inferior.

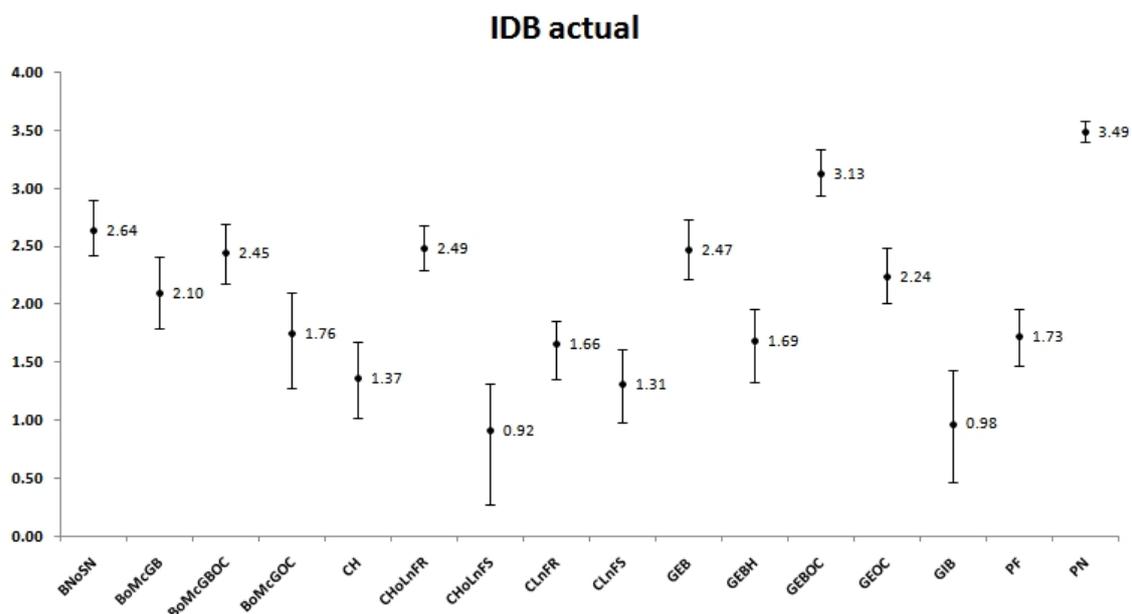


Figura 71. Índice de diversidade bioclimática actual. Se observan los valores medios (IDBm) y sus límites de confianza superior e inferior.

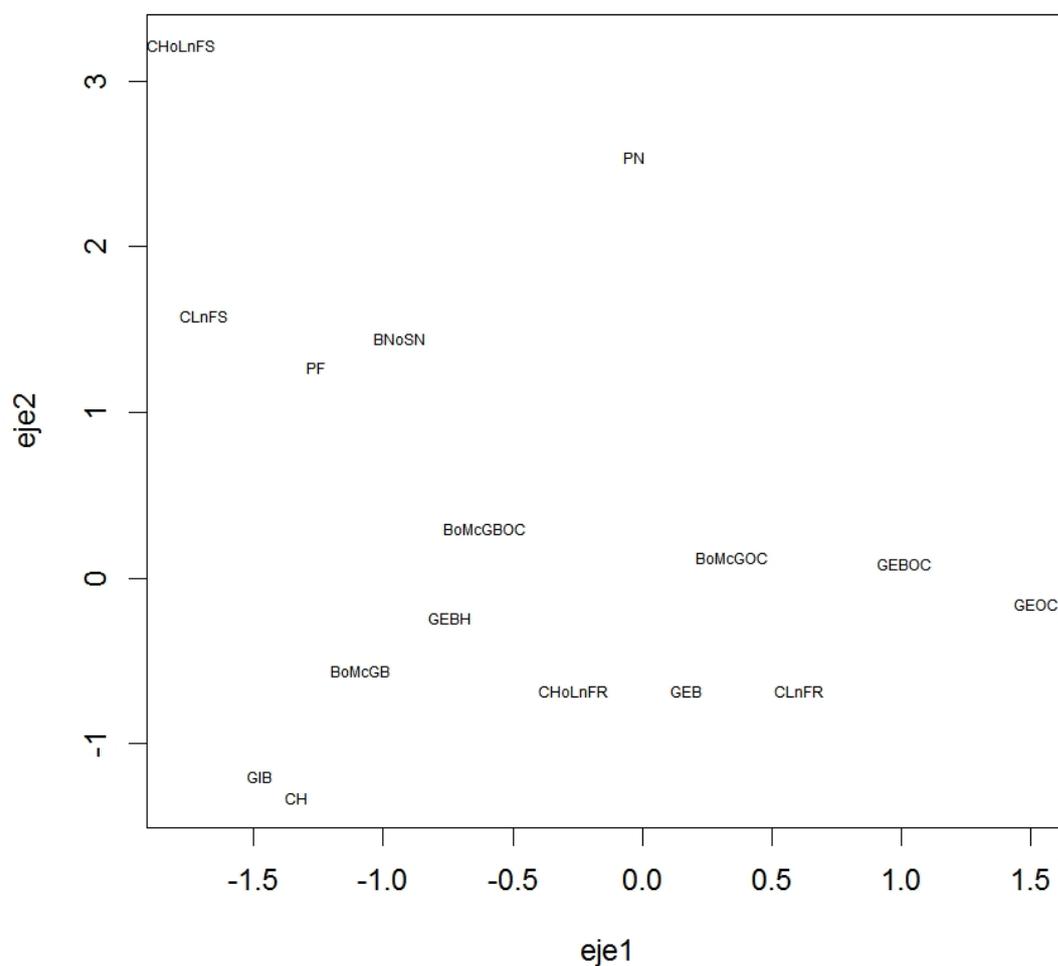


Figura 72. Análisis de correspondencia (AC) actual de las ecorregiones en función de sus características bioclimáticas

No se observaron cambios apreciables en los ICB en los diferentes escenarios de cambio climático, principalmente debido a la baja correspondencia observada en las condiciones actuales. Algo similar se observó en los valores de diversidad climática (IDB). Los cambios de posición en los CA asociados a diferentes escenarios climáticos indicaron que los usos que presentaron mayor ICB, como ganadería extensiva de ovinos y caprino y cultivo de herbáceas, presentaron menores cambios que los restantes aun en el escenario de mayor cambio. Los cambios de posición en los CA experimentados por otros usos no resultaron fácilmente interpretables debido a que los bajos valores ICB indicaron que una amplia proporción de las zonas de vida ocupada por esos usos estuvo compartida con otros usos (Fig. 73 a 84).

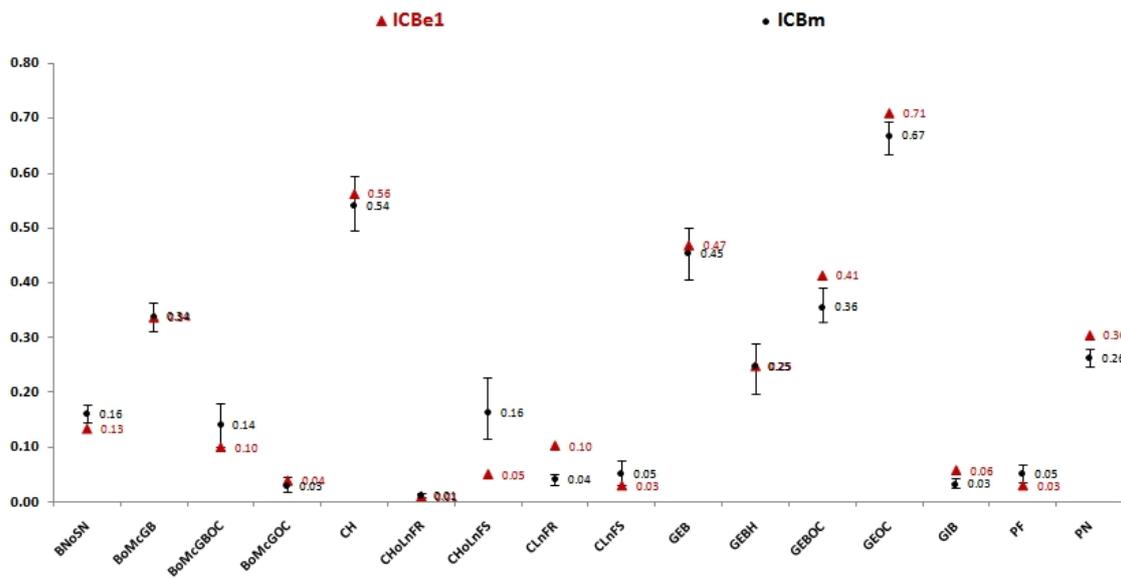


Figura 73. Comparación de ICBm frente al escenario de cambio ICBe1. Se observan también los límites de confianza superior e inferior del ICBm.

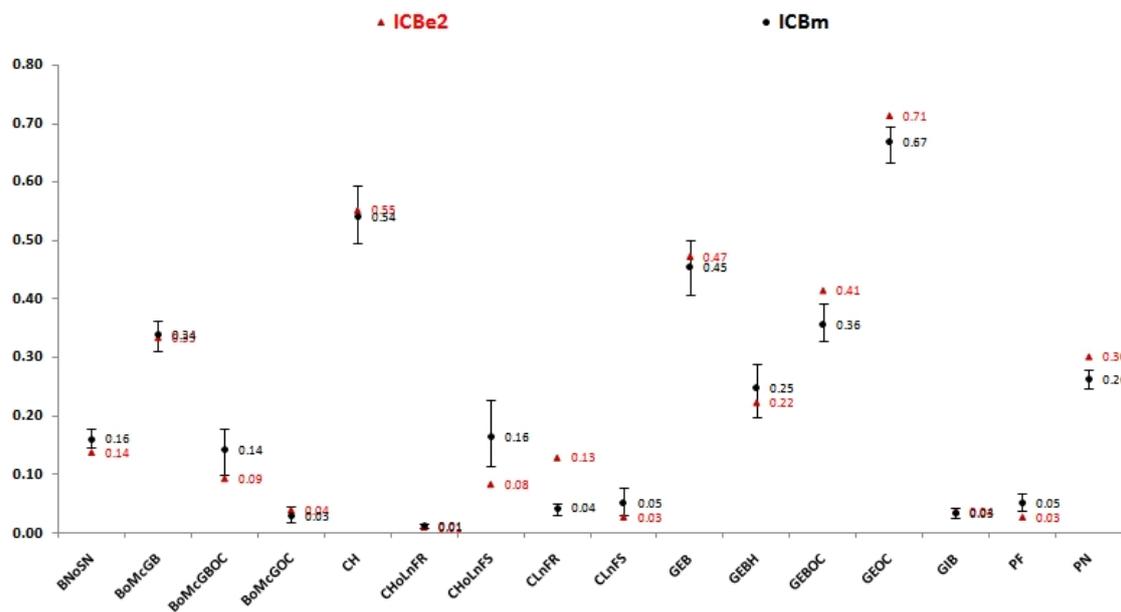


Figura 74. Comparación de ICBm frente al escenario de cambio ICBe2. Se observan también los límites de confianza superior e inferior del ICBm.

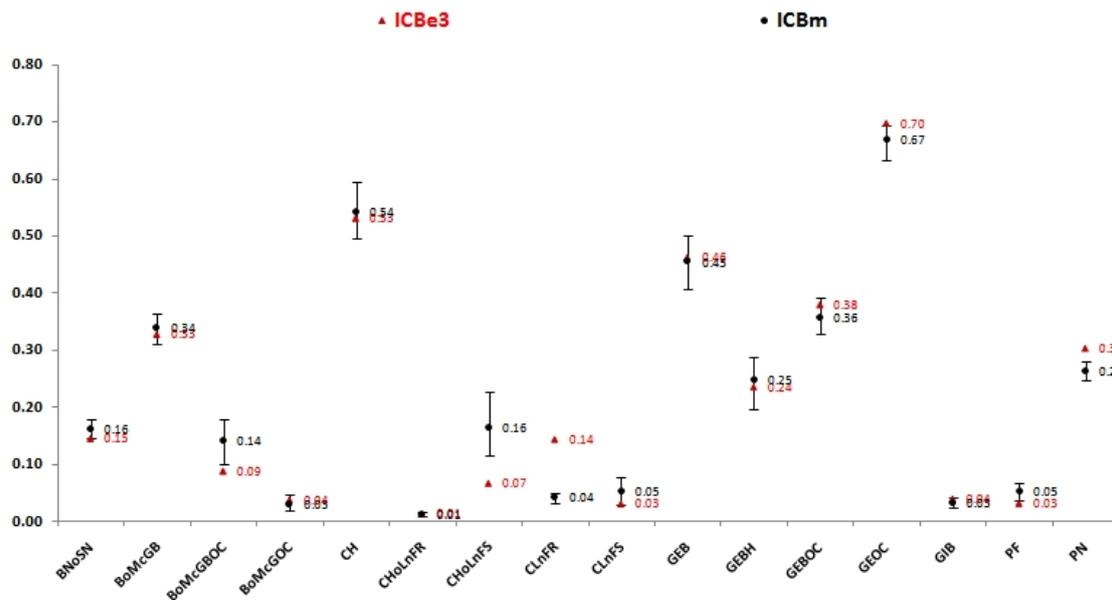


Figura 75. Comparación de ICBm frente al escenario de cambio ICBe3. Se observan también los límites de confianza superior e inferior del ICBm.

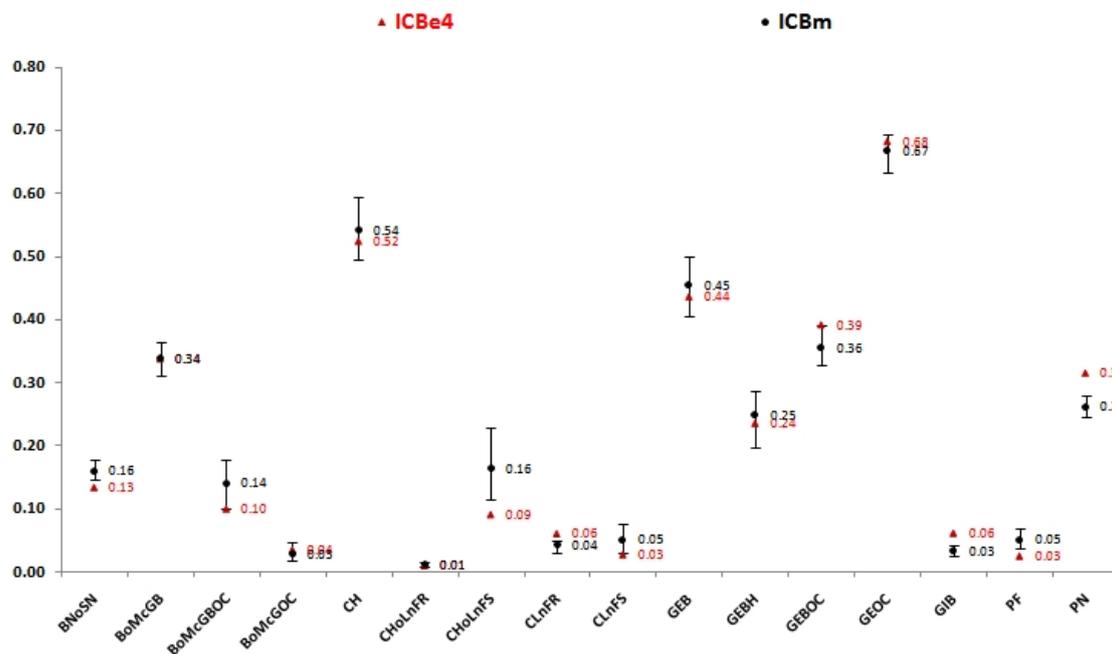


Figura 76. Comparación de ICBm frente al escenario de cambio ICBe4. Se observan también los límites de confianza superior e inferior del ICBm.

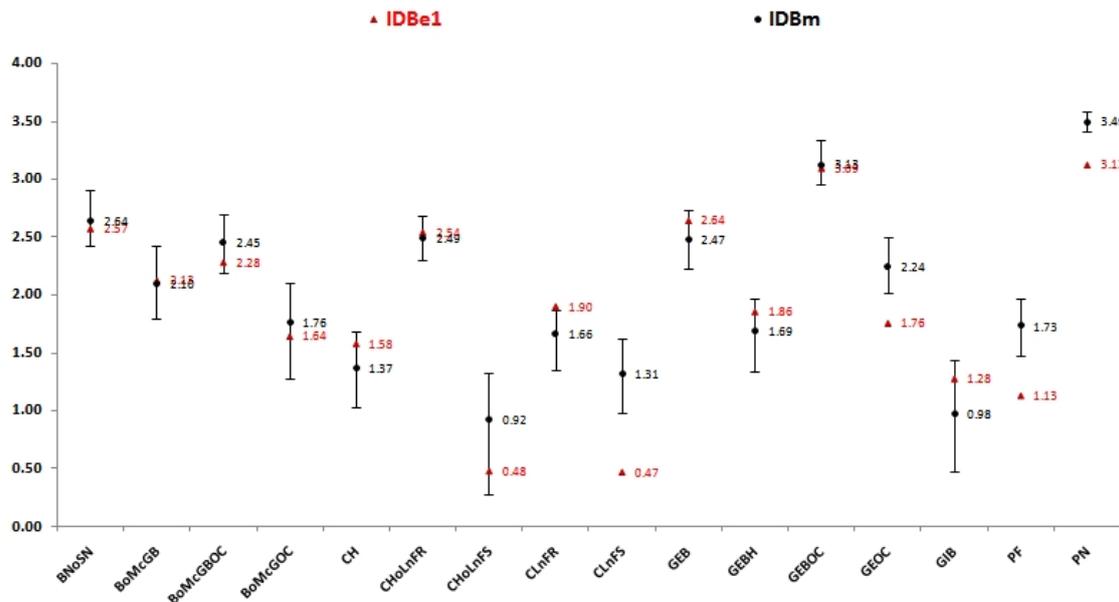


Figura 77. Comparación de IDBm frente al escenario de cambio IDBe1. Se observan también los límites de confianza superior e inferior del IDBm.

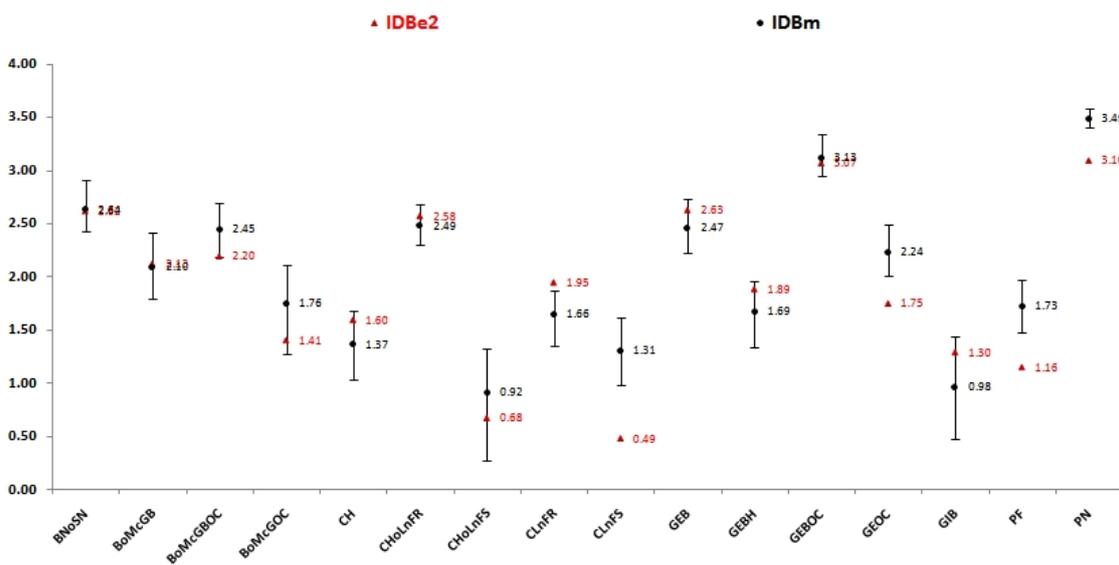


Figura 78. Comparación de IDBm frente al escenario de cambio IDBe2. Se observan también los límites de confianza superior e inferior del IDBm.

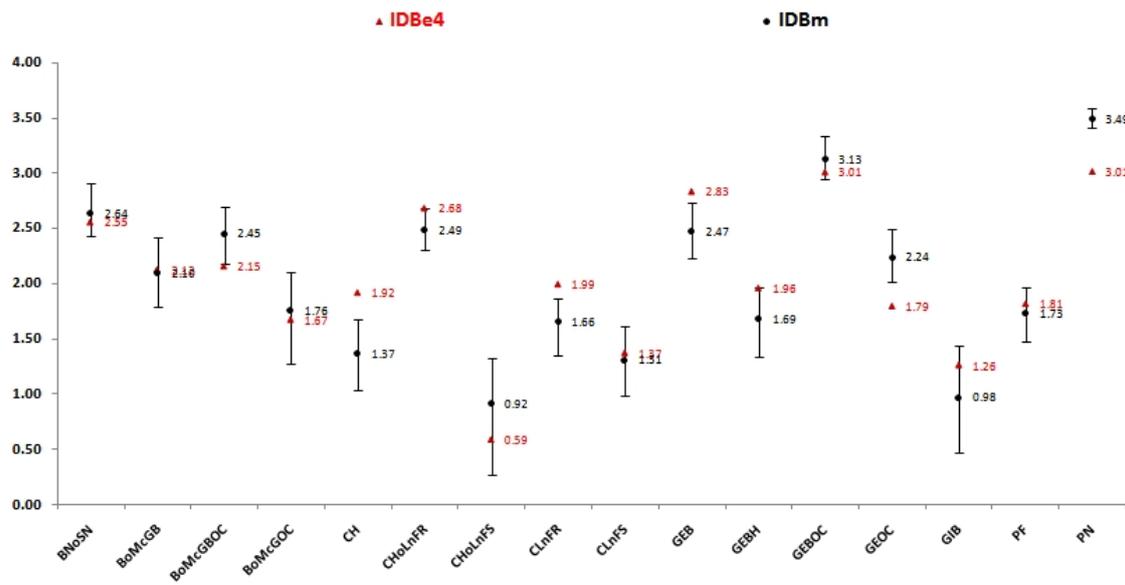


Figura 79. Comparación de IDBm frente al escenario de cambio IDBe3. Se observan también los límites de confianza superior e inferior del IDBm.

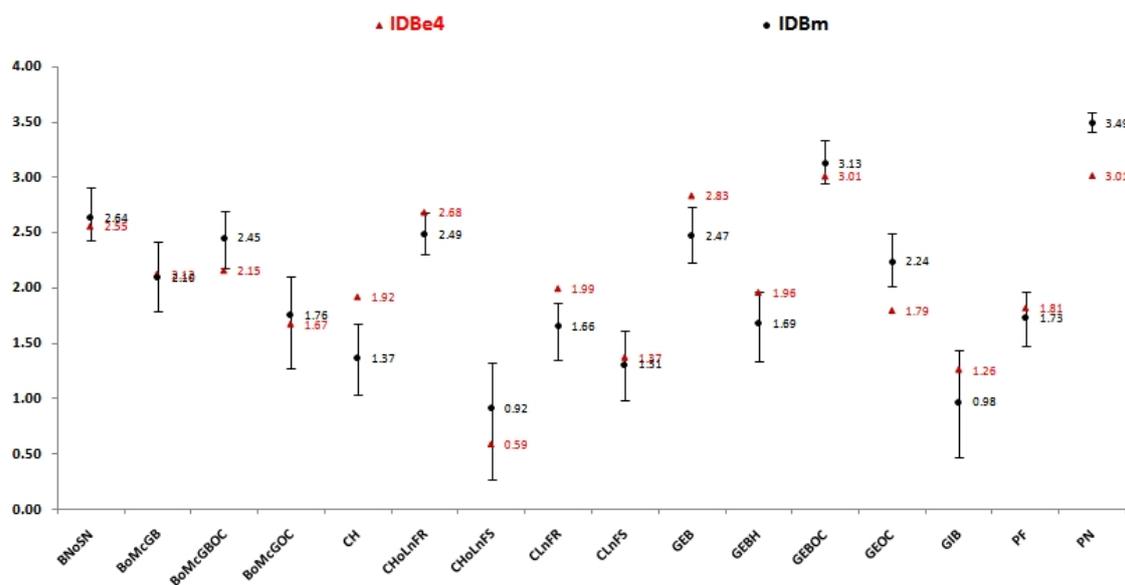


Figura 80. Comparación de IDBm frente al escenario de cambio IDBe4. Se observan también los límites de confianza superior e inferior del IDBm.

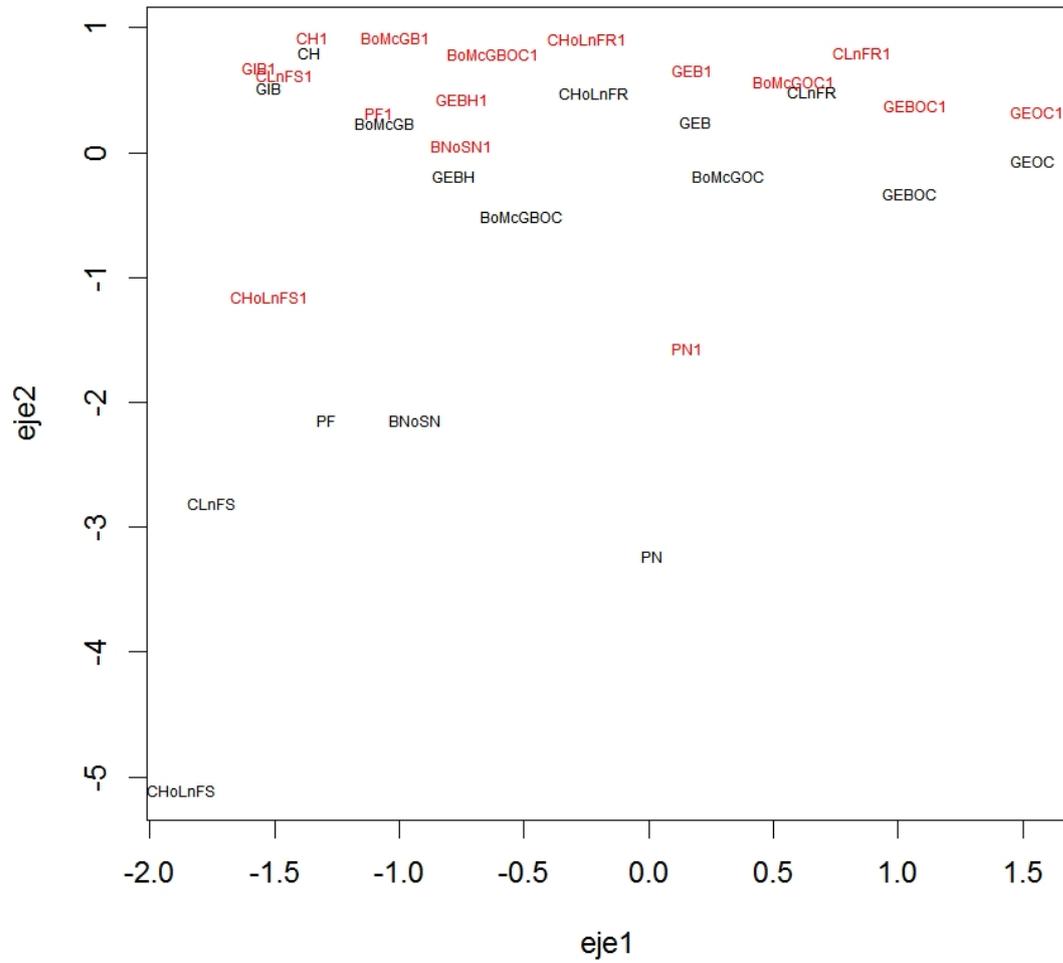


Figura 81. Comparación de AC actual frente al escenario de cambio AC e1

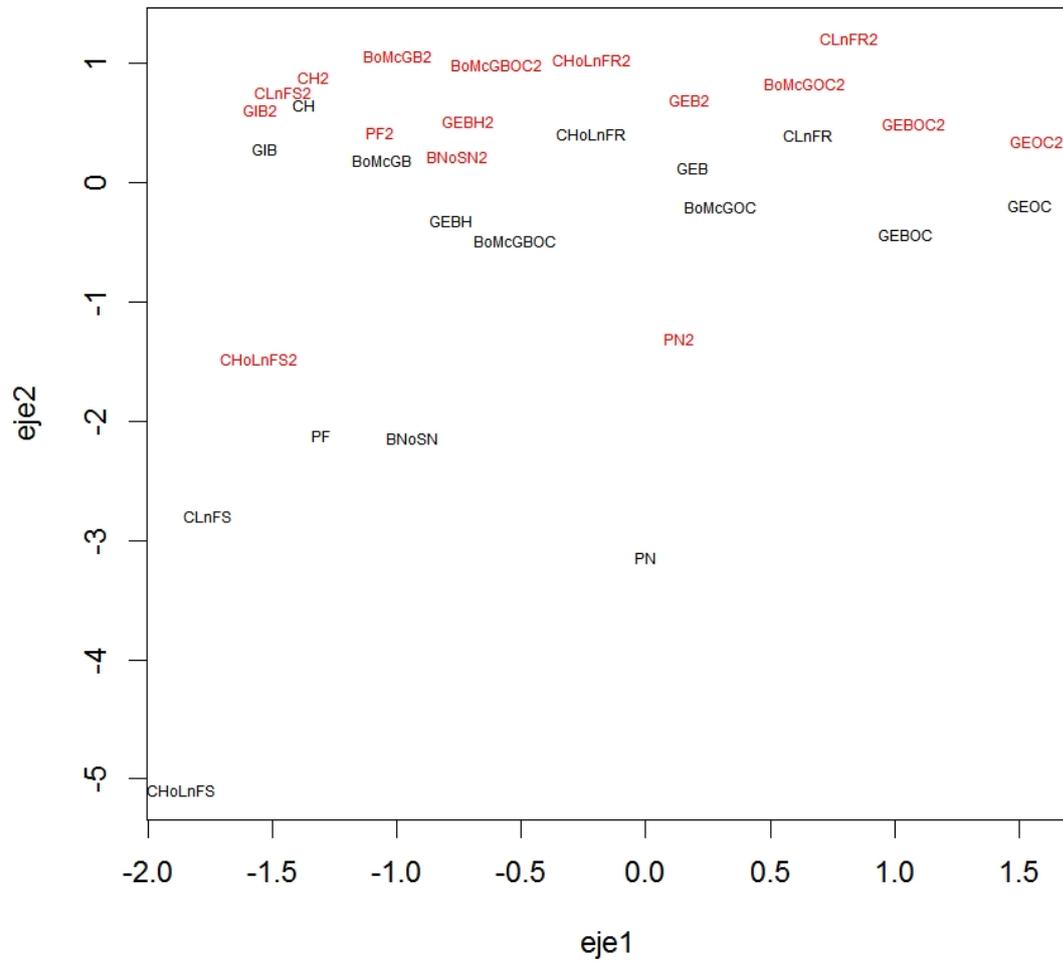


Figura 82 Comparación de AC actual frente al escenario de cambio AC e2

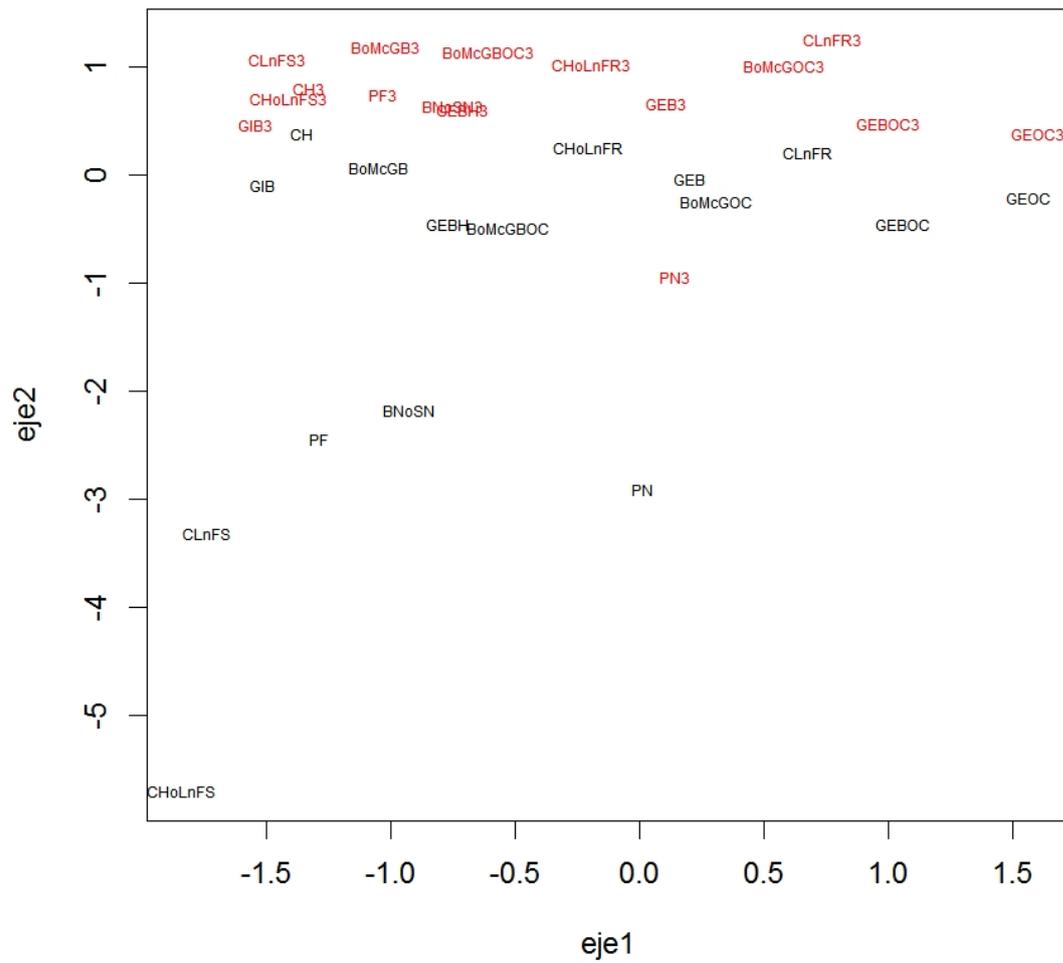


Figura 83. Comparación de AC actual frente al escenario de cambio AC e3

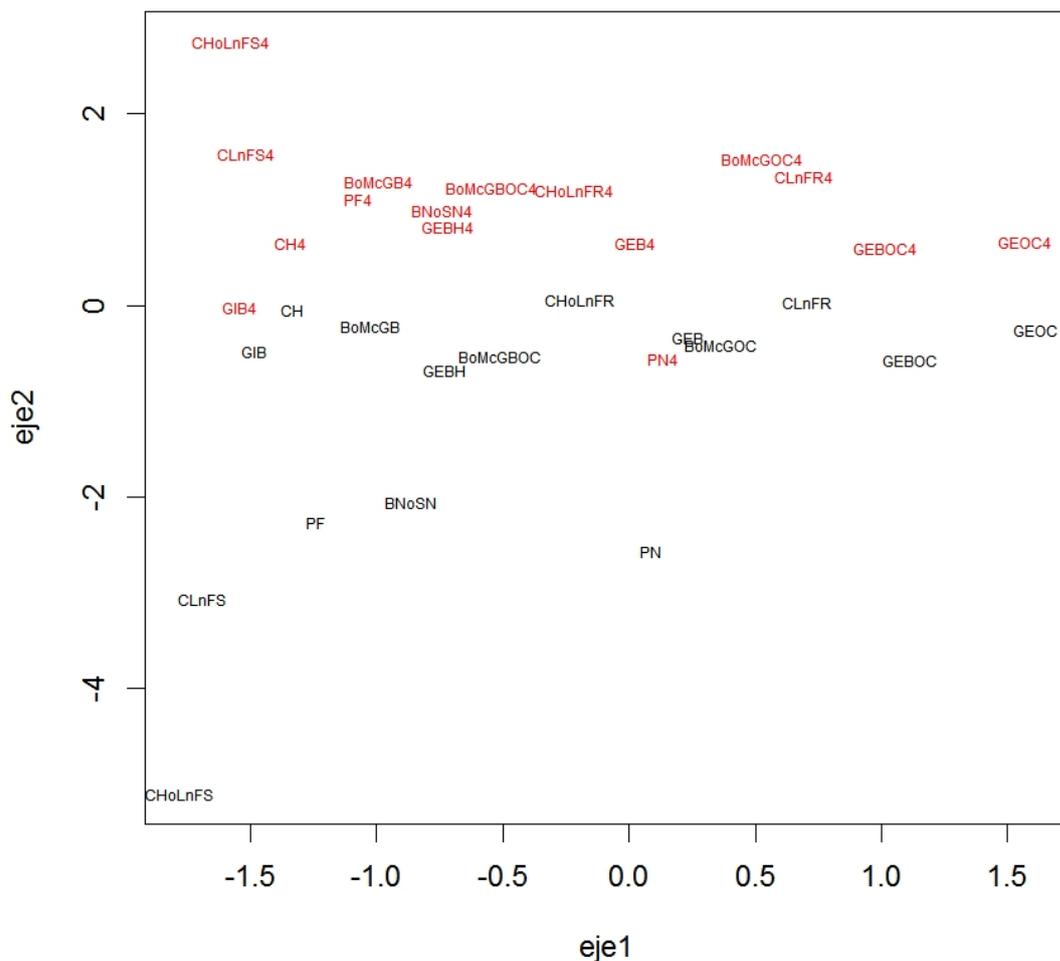


Figura 84. Comparación de AC actual frente al escenario de cambio AC e4

Categorización bioclimática y su potencial para el uso de la tierra

La distribución de las actividades productivas analizadas -agricultura, silvicultura, ganadería- se ajustó al esquema propuesto por Lugo y Morris (1982; cfr. Figura 21). Al agrupar las zonas de vida en las categorías de potencial de uso se observó que si bien la región definida como "Óptima para la producción" se extendió de Norte a Sur de Argentina, tuvo una mayor representación en los sectores Centro-Este y Noreste del país, y ocupó la totalidad de las provincias de Corrientes, Entre Ríos, Santa Fe, Chaco, Formosa, Santiago del Estero, Tucumán y Córdoba, y gran parte de Salta, Jujuy, San Luis, La Pampa, Buenos Aires y Tierra del Fuego. Las zonas de vida definidas en el sector "Demasiado seco" formaron una faja en el Noreste, Centro-Oeste y Sur del país, que incluyó parte de las provincias de Jujuy, Salta, Catamarca, La Rioja, San Juan, Mendoza; La Pampa, Neuquén y casi la totalidad de las provincias de Río Negro, Chubut y Santa Cruz. Las zonas de vida definidas como "Demasiado

húmedas" quedaron restringidas a la provincia de Misiones y a pequeños sectores en el Oeste de las provincias de Neuquén, Río Negro, Chubut y Santa Cruz. Finalmente las zonas de vida agrupadas en la categoría "Demasiado frío", se registraron en áreas de altura reducidas al Oeste de las provincias de Catamarca, La Rioja, San Juan, Mendoza, Santa Cruz y Tierra del Fuego (Fig. 85)

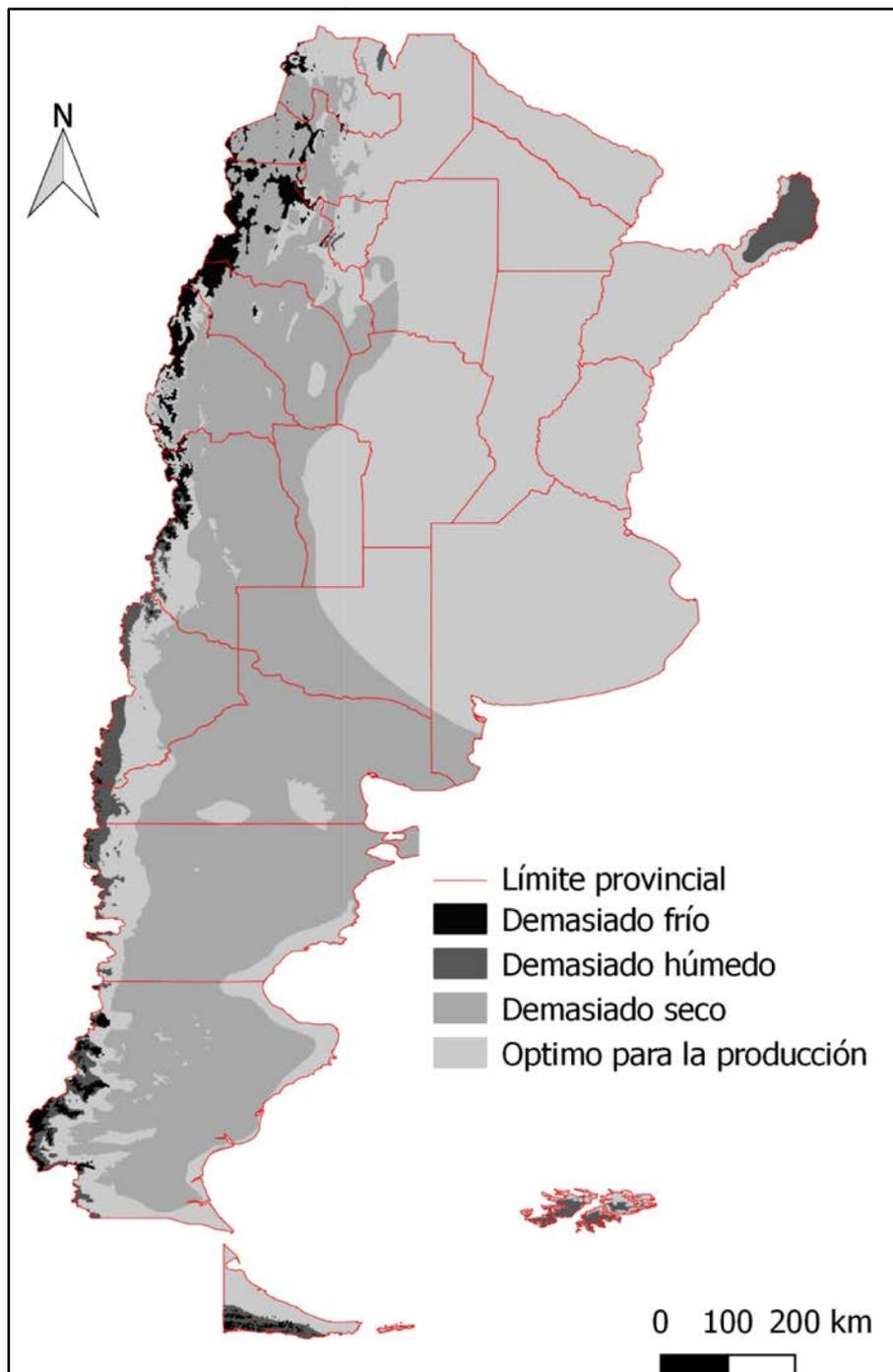


Figura 85. Potencial de uso de la tierra bajo el escenario climático actual.

Si bien las categorías de uso de la tierra analizadas se distribuyeron en numerosas zonas de vida a lo largo del país, la mayor superficie destinada a estas actividades se concentró en poco más de veinte unidades bioclimáticas (Tabla 9). A la vez, se observó que todas las regiones latitudinales tuvieron representación, aunque los usos predominaron en la Región Latitudinal Templada Cálida y en la Región Latitudinal Subtropical. Las zonas de vida categorizadas como "Óptimas para la producción" (OP) incluyeron la mayor parte de la actividad productiva, que también se extendió sobre sectores de zonas de vida definidas como "Demasiado húmedas" (DH) y "Demasiado secas"(DS) (Tabla 9).

Tabla 9. Principales zonas de vida donde se desarrollan las actividades productivas analizadas -agricultura, silvicultura, ganadería-, agrupadas según su potencial de uso, y porcentaje de la categoría de uso de la tierra que se desarrolla en estas. OP= Óptimas para la Producción; DS= Demasiados secas; DH= Demasiado Húmedas.

Potencial	Zonas de vida	BoMcGB	BoMcGBOC	BoMcGOC	CH	CHoLnFR	CHoLnFS	CLnFR	CLnFS	GEB	GEBH	GEBOC	GEOC	GIB	PF
OP	Bosque Húmedo Antiboreal		2								2	2			
OP	Estepa Templada Fría											3	5		
OP	Bosque Húmedo Subalpino Templado frío			13								3			
OP	Bosque Seco Templado Cálido	6			55					16	10			32	
OP	Bosque Húmedo Templado Cálido	6			19	11			32		19			52	25
OP	Estepa Montana Templada Cálida											10	3		
OP	Bosque Seco Subtropical	43	14		12					3	9			2	
OP	Bosque Húmedo Subtropical	10				8			9	2	45				15
OP	Bosque Seco Montano Bajo Subtropical	9	17	26	7	10				4				4	2
OP	Bosque Húmedo Montano Bajo Subtropical	3				8	29		25	3	9			9	26
OP	Bosque Seco Premontano Tropical	11	15			12									
DS	Matorral Desértico Templado Frío					4						2	27		
DS	Matorral Desértico Templado Cálido					7		6		4		15	6		
DS	Estepa Espinosa Templada Cálida					13		20		35		5	3		
DS	Desierto Montano Templado Cálido												6		
DS	Matorral Desértico Montano Templado Cálido											12	31		
DS	Monte Espinoso Subtropical		12												
DS	Desierto Montano Bajo Subtropical							24				7	2		
DS	Matorral Desértico Montano Bajo Subtropical					9		38		4		4			
DS	Estepa Espinosa Montana Baja Subtropical		16	43		3		6		5		8			
DH	Bosque Muy Húmedo Montano Bajo Subtropical						69		32						21
	Total (%)	88	76	82	93	85	98	94	98	76	94	71	83	99	89

En línea con la propuesta de Lugo y Morris (1982), la actividad agrícola se registró en zonas de vida OP, que en el esquema de ecorregiones fueron principalmente áreas de Pampa, Espinal, Chaco Húmedo y Chaco Seco. La ganadería extensiva se dio principalmente en zonas de vida DS, que se correspondieron con las ecorregiones, Estepa Patagónica, Monte de Llanuras y Mesetas, Monte de Sierras y Bolsones, Puna y Altos Andes, mientras que la GEBH y la GIB se concentraron en la región OP. Las

plantaciones forestales se registraron en zonas de vida DH, que coincidieron con la ecorregión SP, aunque se observó que la actividad silvícola también se distribuyó en zonas de vida OP, en lo que se identificó como plantaciones forestales de las zonas de Corrientes, Entre Ríos y extremo Noreste de Buenos Aires. Por otra parte, las distintas categorías de “bosque o matorrales con uso ganadero” se distribuyeron casi en su totalidad en zonas de vida OP (Fig. 86, 87, 88, 89).

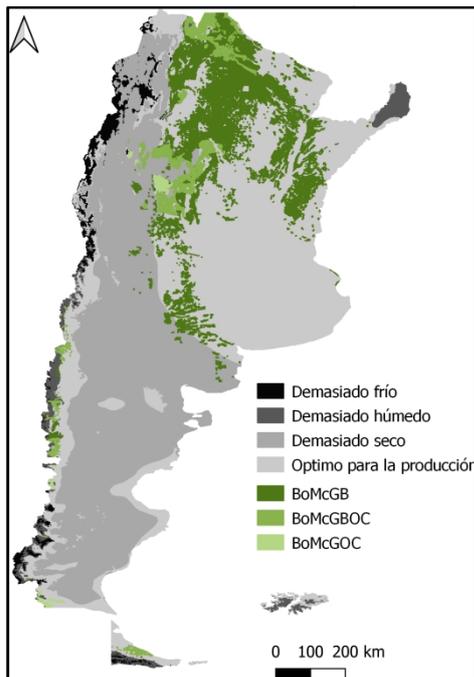


Figura 86. Bosque o matorrales con uso ganadero bajo el escenario climático actual.

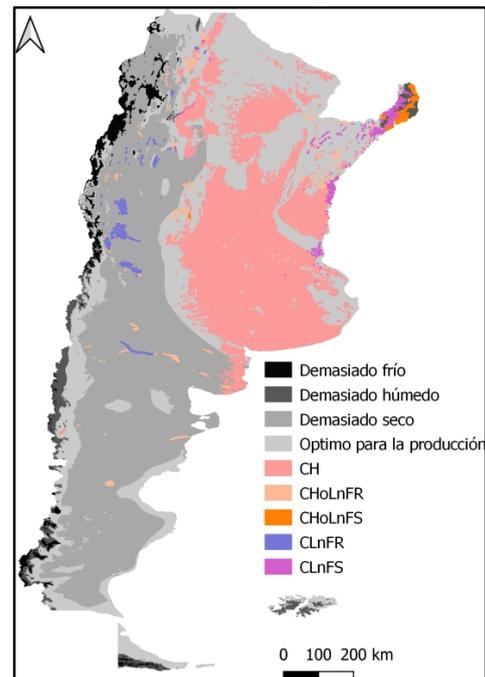


Figura 87. Cultivo de herbáceas o leñosas no forestales bajo el escenario climático actual.

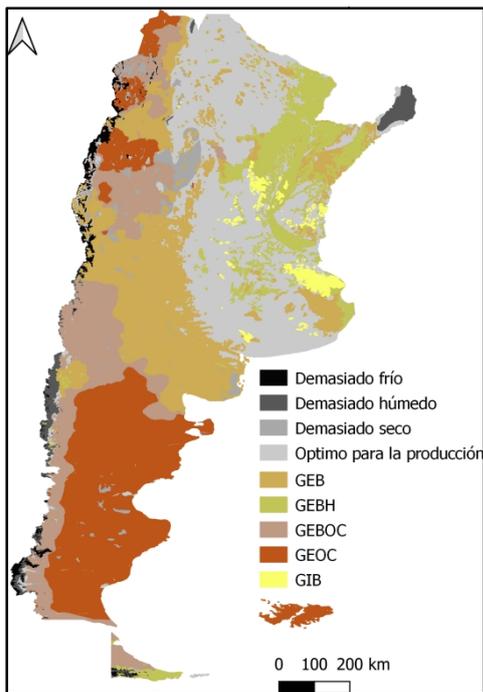


Figura 88. Ganadería extensiva e intensiva bajo el escenario climático actual.

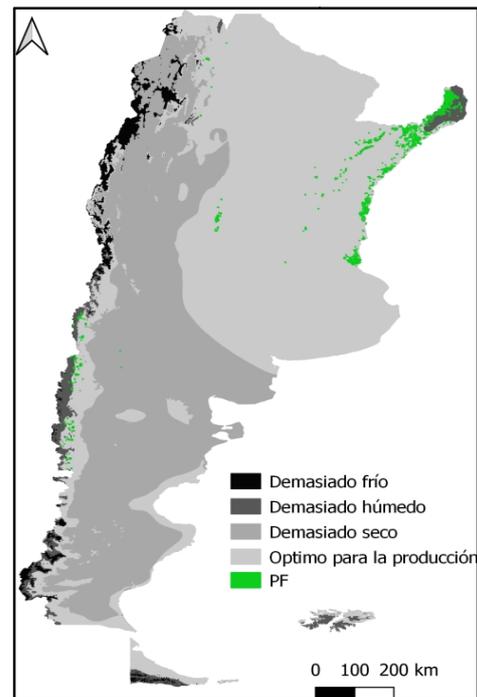


Figura 89. Plantaciones forestales bajo el escenario climático actual.

Este esquema de potencial de uso de la tierra (fig 85) se modificó en línea con los escenarios de cambio climático. Así, el área definida como DS se extendió, a partir del escenario 1, hasta Jujuy en el Norte del país; el área definida como DH en la provincia de Misiones, desapareció casi por completo y se convirtió en OP lo que respondió a la transformación de zonas de vida muy húmedas que se volvieron más secas bajo los escenarios de cambio climático. En el caso de las áreas DF, el cambio más notable se dio en la provincia de Tierra del Fuego, donde los sectores DF se convirtieron a zonas de vida de la categoría DH. El sector OP no sufrió grandes modificaciones, salvo por las zonas costeras en las provincias de Chubut y Santa Cruz que se convierten a DS (Fig. 90, 91, 92, 93).



Figura 90. Potencial de uso de la tierra bajo el escenario climático 1.



Figura 91. Potencial de uso de la tierra bajo el escenario climático 2.



Figura 92. Potencial de uso de la tierra bajo el escenario climático 3.



Figura 93. Potencial de uso de la tierra bajo el escenario climático 4.

4.4 Discusión

Los cambios observados en los mapas de zonas de vida modelados bajo los escenarios de cambio climático para Argentina responden a las proyecciones hechas por grupos de expertos en estudios del clima del país (SAyDS 2014). De esta manera, en el corrimiento de las regiones latitudinales de Norte a Sur, con la consecuente pérdida de la Región Latitudinal Antiboreal, se observa el aumento de la temperatura media en todo el país predicho por el CIMA para todos los escenarios, siendo el escenario 4 (FL-RCP8.5) la situación más extrema. Por otra parte, los cambios son muy similares en los escenarios de futuro cercano (FC-4.5 y FC-8.5) e incluso en el escenario 3 (FL-4.5) en casi todo el país. La desaparición de zonas de vida húmedas y/o muy húmedas sumada a la presencia de una Faja Altitudinal Basal en la Región Latitudinal Tropical modelada en los escenarios de cambio, muestra que el patrón geográfico de aumento de la temperatura media es mayor en el Norte que en el Sur del país, con un máximo en el Noroeste. El informe de la SAyDS 2014 plantea que la región de máximo calentamiento sería la del noroeste, no solo por estar muy alejada del mar, sino por estar encerrada entre las sierras pampeanas por el Este, por los Andes al Oeste y por la Puna al Norte. Por esta orografía, el mayor ingreso de aire en capas bajas es desde el sur, fundamentalmente con el pasaje de frentes fríos, que con el calentamiento global, tendrían un ingreso cada vez más esporádico a esta región, agravando de esta forma el calentamiento provocado localmente por el aumento de los Gases de Efecto Invernadero. Los cambios son menos pronunciados en las regiones latitudinales templadas -fría y cálida- bajo los cuatro escenarios, esto podría deberse a que estas regiones se encuentran más expuestas a la circulación de los vientos provenientes de los océanos (SAyDS 2014). En el caso de la precipitación, se plantea que salvo en el escenario 4, los cambios proyectados por el promedio de los modelos de la base CMIP5 no son importantes, y que incluso se dan dentro del rango de las posibles fuentes de error, por lo que serían poco relevantes (SAyDS 2014). En el escenario 4 (FL-RCP8.5), se proyecta un descenso de las precipitaciones sobre el Oeste de la Patagonia norte y central y un aumento en el Centro y la mayor parte del Este del país. El sistema de Holdridge refleja el descenso de la precipitación en la Región Latitudinal Templada Fría, con la disminución del área ocupada por zonas de vida muy húmedas como el Bosque Muy Húmedo Templado Frío o las Tundras Alpinas Lluviosas, Semisaturadas y

Subsaturadas. Mientras que el aumento de precipitación proyectado en el Centro y Este del país en el escenario 4, no se ve reflejado en el cambio de las zonas de vida, que por el contrario, pasan de zonas de mayor a menor humedad (e.g. Bosque Muy Húmedo Subtropical a Bosque Húmedo Premontano Tropical) o que mantienen el nivel de humedad pero son más cálidas (e.g. Bosque Húmedo Templado cálido a Bosque Húmedo Subtropical). Esta situación puede deberse a que los cambios a nivel de precipitación no sean lo suficientemente significativos como para ser detectados por los rangos logarítmicos que delimitan las zonas de vida en el sistema de Holdridge, y que sea la biotemperatura con sus cambios más marcados, la variable que defina el pasaje de una unidad bioclimática a otra en los escenarios de cambio.

Al evaluar la correspondencia bioclimática de las ecorregiones se observaron distintas situaciones, por un lado, ecorregiones donde el ICB fue alto y los límites de confianza estrechos, como en Estepa Patagónica, Chaco Seco, Bosques Patagónicos, Monte de Llanuras y Mesetas, Altos Andes y Monte de Sierras y Bolsones. Por otro lado, otras donde el ICB fue alto pero los límites de confianza muy amplios como Selva Paranaense y Pampa. También ecorregiones donde el ICB fue bajo como Selva de Yungas, Espinal, Esteros del Iberá, Campos y Malezales y Delta e Islas del Río Paraná; ecorregiones donde el ICB alcanzó valores medios con intervalos de confianza amplios, como Chaco Húmedo. Y finalmente, ecorregiones donde el ICB alcanzó valores medios con intervalos de confianza estrechos, como la Puna.

Los cambios más importantes en los corrimientos de las zonas de vida se observaron en las ecorregiones Selva Paranaense, Selva de Yungas, Chaco Seco, Chaco Húmedo, Monte de Sierras y Bolsones, Puna, Altos Andes y Estepa Patagónica. La Selva **Paranaense** fue la ecorregión que presentó cambios más marcados en cuanto a las zonas de vida. Por otra parte su posición en los Análisis de Correspondencia bajo los escenarios de cambio climático, tiende a parecerse a la posición del Chaco Húmedo en el escenario climático actual, donde predomina el Bosque Húmedo Subtropical. Placci y Holz (2004) indican que el clima del Chaco Húmedo permite el desarrollo de bosques florística y fisonómicamente muy similares a la Selva Paranaense, que se desarrollan sobre suelos con pocas limitaciones en su capacidad de almacenamiento de agua. En cambio, los suelos predominantes de la ecorregión Chaco Húmedo, sí presentan

limitaciones en el almacenamiento de agua y en consecuencia expresan un tipo de vegetación que no resulta coincidente con la esperable a partir de las condiciones climáticas. De esta manera, es posible que la Selva Paranaense mantenga características fisonómicas y florísticas similares a las actuales en los escenarios de cambio climático. Además Scarano y Ceotto (2015) indicó que las características resilientes de esta ecorregión permiten presumir un bajo impacto del cambio sobre sus características ecológicas. En los escenarios de clima futuro la ecorregión **Altos Andes** tendió a presentar condiciones similares a las que presenta la Puna en el escenario actual, debido a la expansión de las zonas de vida Desierto Perárido Montano Tropical, Desierto Montano Tropical y Desierto Subalpino Tropical. Las ecorregiones Puna y Altos Andes difieren en la altitud, y por ende en las variables que de esta dependen (Morello *et al.* 2012). Godoy-Bürki (2016) planteó que muchos taxones montanos se dispersan hacia elevaciones mayores en respuesta al calentamiento global. La autora observó una tendencia de las especies endémicas del NOA a desplazarse en dirección este-oeste, desde las zonas más bajas a las más altas, bajo distintos escenarios de cambio climático que implicaban un aumento de la temperatura en la región. De esta manera, podría suceder que la vegetación altoandina llegara entonces a parecerse a la de la Puna como se deduce de los Análisis de Correspondencia aquí presentados. Por otra parte, Godoy-Bürki (2016) destacó que si bien la vegetación endémica de Altos Andes y Puna tendería a modificar su distribución frente a los escenarios de cambio, la alta resistencia de esta flora a las condiciones climáticas extremas de estas ecorregiones las convertiría en especies tolerantes a cambios moderados de temperatura. Por su parte la **Puna**, que también presentó cambios de ICB mayores de lo esperado por la incertidumbre de los datos, no presentó en los Análisis de Correspondencia un cambio de posición claramente interpretable en términos de una mayor similitud climática con otras ecorregiones entre el escenario actual y los distintos escenarios de cambio climático, la misma situación se observó en el caso de la ecorregión **Monte de Sierras y Bolsones**. En cambio, Estepa Patagónica y Monte de Llanuras y Mesetas presentaron tendencias de cambio en los Análisis de Correspondencia que sugieren en ambos casos una mayor similitud con condiciones actuales de ecorregiones ubicadas inmediatamente al norte: Estepa Patagónica hacia Monte de Llanuras y Mesetas, y **Monte de Llanuras y Mesetas** hacia Chaco seco. En

Estepa Patagónica los cambios observados en las zonas de vida fueron coherentes con los cambios observados en el ICB y en su posición en los Análisis de Correspondencia. Esta ecorregión experimentó un aumento en la proporción de zonas de vida templado cálidas, y una consecuente retracción de las zonas de vida templado frías. En consecuencia, tendió a aumentar su similitud con el Monte de Llanuras y Mesetas. La ecorregión de **Yungas** experimentó la expansión de las zonas de vida de Bosque Seco Premontano Tropical y Bosque Seco Montano Bajo Tropical, y la presencia de un Bosque Seco Tropical de Faja Basal que no se registraba en el escenario actual para Argentina; la Estepa Espinosa Montana Baja Tropical también se expandió en el sector sur de la ecorregión Yungas. Pacheco *et al.* (2010) modelaron la distribución geográfica de especies arbóreas de las yungas bajo diferentes escenarios climáticos, y encontraron que resulta esperable una retracción de entre el 40 y 50 % del área de distribución de esas especies, así como un desplazamiento en su localización. Esas proyecciones coinciden con las tendencias observadas en esta tesis. Los corrimientos en los límites de las zonas de vida observados para **Chaco Seco** no se reflejaron en cambios de su ICB, probablemente debido a que las nuevas zonas de vida que se registraron en esa ecorregión bajo escenarios climáticos futuros, fueron compartidas con otras ecorregiones en proporciones similares a las zonas de vida de la situación actual. En este caso el ICB no permitió evidenciar el cambio de posición observado en el Análisis de Correspondencia. La posición de Chaco Seco en esos análisis bajo escenarios climáticos futuros no se asemeja a la de ninguna ecorregión actual en acuerdo con la aparición de nuevas zonas de vida. Si bien en el ICB de **Chaco Húmedo** no se observaron cambios importantes, su aumento de similitud con Chaco Seco en el Análisis de Correspondencia se correspondió con la presencia, en los distintos escenarios, de las zonas de vida Bosque Húmedo Premontano Tropical, Bosque Seco Premontano Tropical y Bosque Seco Tropical, en áreas que correspondían por completo al Bosque Húmedo Subtropical en el escenario actual. El Bosque Húmedo Premontano Tropical y el Bosque Seco Premontano Tropical caracterizan al Chaco Seco y la Selva Pedemontana en la actualidad, que son ecorregiones afines a la fisonomía y composición de los bosques del Chaco Húmedo (Placci y Holz 2004). Respecto de la ecorregión **Bosques Patagónicos**, si bien no experimentó cambios de su ICB mayores que lo atribuible a la incertidumbre de los datos, mostró una tendencia a parecerse a

las condiciones actuales de Estepa Patagónica. Esto resulta asimilable a las tendencias de cambio actuales en las que el aumento de la temperatura y disminución de las precipitaciones determina un aumento en la frecuencia de incendios (Veblen *et al.* 2004), y en consecuencia la reducción de cobertura boscosa. Esas características climáticas también inciden negativamente sobre la regeneración de especies típicas de esos bosques como *Nothofagus pumilio* (Srur *et al.* 2018) y *Austrocedrus chilensis* (Suarez y Kitzberger 2010). Por otra parte, el aumento de la similitud entre las condiciones climáticas futuras de **Campos y Malezales** y **Esteros del Iberá** con las condiciones actuales de Chaco Húmedo sugiere un futuro aumento de la participación de las especies arbóreas de Chaco Húmedo que actualmente se encuentran presentes (Neiff 2004) en esas ecorregiones. Ante el cambio evidenciado por las zonas de vida, producto de los cambios en temperatura y precipitación, resulta esperable un impacto sobre la dinámica de los sistemas lagunares del Iberá, aunque Montroull *et al.* (2013) encontraron que no se produciría un déficit hídrico en la región a pesar del aumento de las temperaturas proyectadas, probablemente debido a que el incremento de precipitación compensaría la mayor evapotranspiración, dando lugar a un aumento en el caudal del principal río de la región del Iberá.

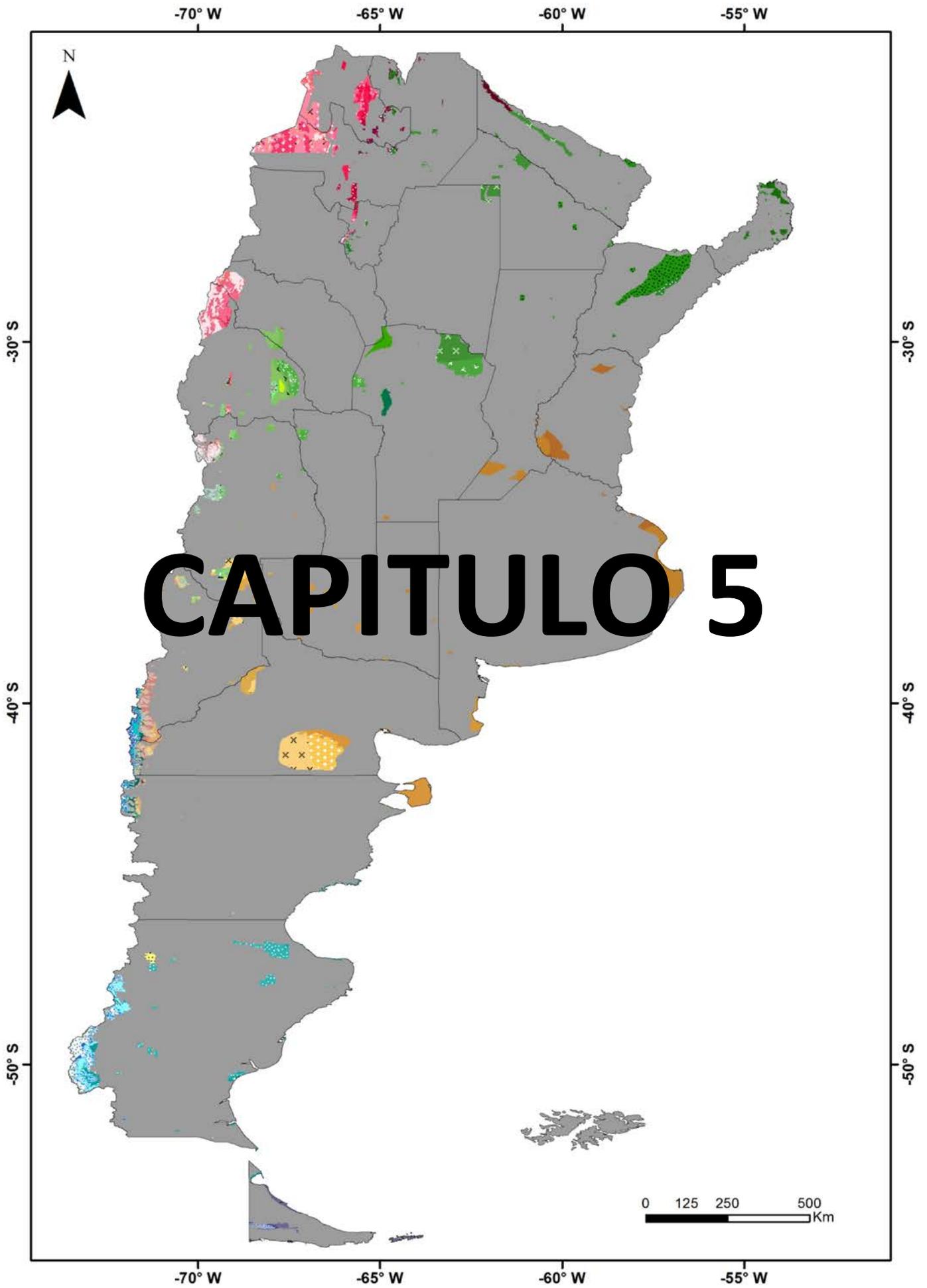
El 80% de las zonas de vida identificadas para Argentina se encuentra representado en el Sistema Nacional de Áreas Protegidas, y este porcentaje se mantiene en los distintos escenarios de cambio climático. A pesar de resultar un valor elevado, sólo implica que en poca superficie territorial existe una gran diversidad bioclimática, ya que en conjunto, no llegan a superar el 10 % de la superficie total del país. Por otra parte, la mayoría de las zonas de vida incluidas en el SNAP son representadas en menos del 25% de su superficie total. Así, deberían aumentarse los esfuerzos de conservación, sobre todo en la Región Latitudinal Tropical que, de acuerdo a los resultados obtenidos, se prevé será la más afectada ante los posibles escenarios de cambio climático, junto con la Región Latitudinal Antiboreal.

Los índices bioclimáticos resultantes del análisis de usos de la tierra y zonas de vida mostraron una correspondencia climática menor que aquella obtenida para las ecorregiones, y por tanto los cambios fueron difícilmente interpretables.

En el modelado del potencial de uso de las zonas de vida, el cambio más marcado fue la pérdida de la región definida como “Demasiado Húmeda”, lo que implicaría la necesaria adaptación de las plantaciones forestales de la provincia de Misiones a la categoría de menor humedad definida como “Óptima para la producción”, lo que ya se registra para las plantaciones forestales de Corrientes, Entre Ríos y extremo Noreste de Buenos Aires.

De acuerdo a Bianchi Y Cravero (2010), la potencialidad climática de una región se considera un factor determinante de la aptitud de uso de las tierras, que define las posibilidades agrícolas, ganaderas y forestales, así como otras actividades económicas. De esta manera, enmarcar la distribución de los usos de la tierra de Argentina en el esquema de potencial de uso de Lugo y Morris (1982), permitió modelar el impacto de posibles cambios climáticos en los límites de estas regiones, lo que podría aportar a una mejor planificación.

En conclusión, respecto de la hipótesis 1, las zonas de vida tendieron a representar áreas ecológicamente homogéneas sólo en los casos en los que la fisonomía respondió principalmente a factores climáticos pero no lo fueron en aquellos casos en los que factores no climáticos condicionaron las características de los sistemas ecológicos. La hipótesis 2 coincidió con los resultados obtenidos en ecorregiones con mayores ICB, en las que ese índice disminuyó bajo escenarios de cambio climático que redujeron la correspondencia entre sus límites actuales y la nueva configuración de zonas de vida. En lo referente a las hipótesis 3 y 4, el uso presentó una correspondencia con las zonas de vida sólo en dos casos y no se observó una disminución de esa correspondencia bajo escenarios climáticos futuros.



CAPITULO 5

CAPITULO 5. DISCUSIÓN FINAL

El trabajo desarrollado en esta tesis permite concluir que el sistema de zonas de vida de Holdridge representa una zonificación ecológica fácil de implementar y que puede proyectarse sobre la base de cambios esperados en los factores ambientales que la definen. Este modelo propone una manera de combinar la temperatura y la precipitación para definir áreas bioclimáticamente homogéneas -zonas de vida-, que pueden considerarse adecuadas en función de las relaciones que se observaron con las unidades ecológicas definidas por las ecorregiones y con la distribución de los diferentes tipos de uso de la tierra.

La aplicación del sistema de Holdridge al territorio argentino resultó en un alto número de zonas de vida en relación con la alta heterogeneidad bioclimática resultante de las diferentes combinaciones de biotemperaturas medias anuales y precipitación total anual acumulada. Esa heterogeneidad climática se relaciona con el amplio gradiente latitudinal y topográfico, así como con la influencia de las corrientes oceánicas sobre los componentes climáticos.

Los datos climáticos, derivados de modelos, y usados en este trabajo para aplicar el sistema de Holdridge, tienen asociados errores de estimación que, representan un grado de incertidumbre, y cuyos efectos restan precisión a la clasificación ecológica de zonas de vida. Los resultados obtenidos a nivel país muestran que, mientras el 75% del territorio se clasificó correctamente, un 25% se vio afectado por la incertidumbre de los datos climáticos. Al analizar los resultados de la clasificación para cada región latitudinal separadamente, la incertidumbre aumentó en algunas regiones como la tropical y la antiboreal, llegando casi al 40% del territorio clasificado con incertidumbre. Esto se relacionó con la heterogeneidad climática del territorio, que influye directamente en la incertidumbre de los datos climáticos. Por otra parte, el acuerdo entre la zonificación ecológica calculada con datos locales y con datos globales resultó similar al acuerdo observado para los datos locales al contemplar el efecto de la incertidumbre, con lo cual, la diferencia entre ambos -MCL y MCG- resultó aceptable para proyectar las zonas de vida a futuro con modelos climáticos globales.

El ajuste propuesto en este trabajo para la definición de la línea de heladas, que establece el límite entre las regiones latitudinales templada cálida y subtropical para la Argentina, mostró un corrimiento respecto del límite original -establecido en 18°C- hacia una mayor biotemperatura. A un lado y otro de esta línea de heladas se establecen diferencias a nivel de las especies vegetales presentes. En el caso de Argentina, este límite mostró diferencias entre grandes grupos fisiológicos de plantas al coincidir en buena parte con el límite geográfico que separa las provincias fitogeográficas Chaqueña-Espinal y Puneña-Patagónica definidas por Cabrera (1971).

Las tendencias de cambio climático establecidas para Argentina se vieron representadas en gran medida por las proyecciones de cambio del sistema de zonas de vida, en donde el escenario más extremo muestra un marcado aumento de la temperatura en el Noroeste del país. La aparición de zonas de vida tropicales basales en estos escenarios, representa uno de los cambios más importantes detectados, puesto que implica biotemperaturas promedio anuales mayores a 24°C, llegando en algunos sectores a 28°C, cuando alrededor del planeta en el escenario actual, estos valores superan por poco los 27°C. Por otra parte, Holdridge no considera cambios en la frecuencia de sequías o heladas si éstas no afectan a los valores anuales medios. De esta manera, en futuros análisis habría que evaluar si las zonas de vida permiten identificar cuáles son las áreas donde tienden a ocurrir aumentos o disminuciones en esas frecuencias para poder tratar procesos de cambio climático que podrían afectar a la distribución de especies y el uso de la tierra, pero que no se reflejan en los valores medios de temperatura y precipitación.

La comparación visual entre el mapa de zonas de vida y el de las ecorregiones indica una correspondencia en su distribución que refleja que las zonas bioclimáticamente homogéneas, definidas por el sistema de Holdridge, son interpretables ecológicamente. Los bosques húmedos de las ecorregiones Selva Paranaense, Chaco Húmedo y Yungas se identificaron claramente como zonas de vida diferentes. En las áreas de bosque seco, el Chaco Seco se diferenció del Espinal y éste del Monte. Incluso las dos ecorregiones de Monte se correspondieron con zonas de vida diferentes. En la Patagonia se diferenciaron la Estepa Patagónica de los Bosques Patagónicos. En áreas con amplias variaciones climáticas, asociadas con gradientes topográficos, se observó una marcada diferenciación en zonas de vida dentro de una

misma ecorregión como en las Yungas, Puna y Altos Andes así como en Estepa y Bosques Patagónicos. Esa diferenciación indica una mayor resolución ambiental en las zonas de vida que en las ecorregiones. Mientras que el patrón opuesto se observa en ecorregiones de menor complejidad topográfica. Sin embargo, en dos casos ocurre claramente lo contrario. Uno de ellos lo constituye la ecorregión Esteros del Iberá, en la que particularidades topográficas e hidrológicas determinan la conformación de sistemas lénticos en lugar de bosques húmedos. El otro caso es el de la ecorregión Pampa, que en el mapa de zonas de vida tendió a superponerse parcialmente con el Espinal, y cuya fisonomía predominante, los pastizales, no coincide con el tipo de vegetación vinculado a las zonas de vida del sistema de Holdridge -Bosque Húmedo y Bosque Seco-. La ausencia de bosques en la Pampa representa un antiguo tema de discusión. Es probable que, al igual que lo observado en la ecorregión Esteros del Iberá, existan causas locales de la discrepancia entre la vegetación real y lo esperable sobre la base de la zona de vida. Diversos autores plantearon que el suelo y el relieve estarían relacionados con la ausencia de bosques en la Pampa (Parodi 1942, Vervoort 1967, Burgos 1968, Arturi y Goya 2004) aunque también se sugirieron causas biogeográficas históricas (Arturi y Goya 2004, Chaneton *et al.* 2013). La incidencia de factores no climáticos sobre las características bióticas podría representar una limitante a la aplicación del Sistema de Holdridge como esquema de zonificación ecológica, pero esas situaciones resultan claramente identificables al aplicar este sistema, y es posible que se puedan estudiar los efectos de las tendencias climáticas aun sobre sistemas ecológicos principalmente condicionados por factores no climáticos.

Las tendencias observadas en el análisis visual quedaron apropiadamente reflejadas en los análisis formales como el Análisis de Correspondencia y el cálculo de los índices de correspondencia bioclimática y de diversidad bioclimática. El análisis multivariado reflejó formalmente las tendencias apreciadas en la interpretación visual de los mapas de ecorregiones y zonas de vida. En primer lugar, la distancia bioclimática en el gráfico multivariado se correspondió con el patrón geográfico y fisonómico. En segundo lugar, la similitud bioclimática observada entre algunas fisonomías contrastantes refleja que esas diferencias podrían estar reguladas por factores diferentes del clima. En particular la cercanía entre la Selva Paranaense, Esteros del

Iberá y Campos y Malezales, refleja la incidencia de factores topográficos y edáficos que promueven el desarrollo de fisonomías contrastantes bajo similares condiciones climáticas como fue señalado para el Chaco Húmedo (Placci y Holz 2004). El índice de correspondencia bioclimática también resultó apropiado para evaluar numéricamente en qué medida la diferenciación fisonómica se corresponde con una diferenciación bioclimática, y además permitió evaluar la incidencia de la incertidumbre de los datos climáticos locales sobre esa correspondencia. Estepa Patagónica y Chaco Seco presentaron altos valores de correspondencia y estrechos intervalos de confianza, y además estuvieron claramente diferenciados del resto de las ecorregiones en el análisis multivariado. Selva Paranaense y Pampa presentaron altos valores de correspondencia pero amplios intervalos de confianza, indicando que esa correspondencia es sensible a la variabilidad de los datos climáticos actuales, probablemente porque sus valores medios de biotemperatura y precipitación resultaron cercanos a los límites de las respectivas zonas de vida.

Las relaciones analizadas entre el sistema de Holdridge y las ecorregiones permitieron establecer una base para la interpretación de posibles impactos del cambio climático sobre sistemas ecológicos del país, a través de las proyecciones en las zonas de vida y su comparación con la variabilidad aportada por la incertidumbre de los datos locales. Los resultados encontrados mediante el análisis de esas relaciones tendieron a coincidir con tendencias descritas para diferentes regiones del país, así como con modelos de distribución de especies proyectados a futuro. En particular se encontró que el efecto de la incertidumbre de los datos locales resulta en una variabilidad apreciable, de modo que muchos cambios climáticos proyectados para las ecorregiones no superan esos niveles de variabilidad. Tomando en cuenta ese resultado, los principales cambios bioclimáticos, bajo los escenarios futuros, se localizan en Puna, Yungas, Selva Paranaense y Estepa Patagónica. En todos los casos esos cambios predicen un proceso de calentamiento y pérdida de diversidad bioclimática. En algunos de esos sistemas el impacto real sobre los sistemas ecológicos podría ser más severo que en otros. Especialmente el pedemonte de las yungas podría tender a parecerse a Chaco Seco; mientras que el clima esperable para la Selva Paranaense podría no representar limitantes para esa ecorregión (Placci y Holz 2004)

cuya flora arbórea, por ejemplo, presenta especies propias de bosques húmedos y otras de bosques secos (Oyarzabal *et al.* 2018).

Si bien la vinculación del sistema de Holdridge con las ecorregiones permitió interpretar posibles impactos del cambio climático sobre los biomas del país a través de las proyecciones en las zonas de vida, en trabajos posteriores habría que analizar, dentro de ecorregiones, la correspondencia de zonas de vida con unidades fisonómicas de mayor detalle y estudios a escala local de diversos grupos biológicos.

Sobre la base de los cambios predichos para diferentes ecorregiones es posible analizar las estrategias de distribución de áreas protegidas. Esas proyecciones permiten identificar los principales vacíos de la red actual de áreas protegidas. Los cambios en la distribución de zonas de vida observados en la Selva de las Yungas indican que las áreas protegidas en esa ecorregión cubren un amplio rango de condiciones bioclimáticas, actuales y futuras, como fue reconocido por Pacheco *et al.* (2010). Sin embargo en Chaco Seco, Chaco Húmedo y Estepa Patagónica, las actuales áreas protegidas abarcan solo parte de las condiciones bioclimáticas, y se localizan principalmente en áreas con importantes cambios de zonas de vida bajo escenarios futuros. De manera que en estas tres ecorregiones se evidencia la necesidad de aumentar la representación de áreas protegidas en los sectores sur de cada una, en los que se mantienen las actuales zonas de vida aún bajo escenarios de cambios climáticos extremos. Estos ejemplos indican que la representación de zonas de vida en el Sistema Nacional de Áreas Protegidas resulta insuficiente, en el escenario climático actual y futuro, frente a la diversidad bioclimática que presenta Argentina y la sensibilidad que muestran ciertos sectores como la Región Latitudinal Tropical y la Región Latitudinal Antiboreal. Por otra parte, estudios recientes (e.g. Baldi *et al.* 2019) destacan la importancia de planificar una ampliación del SNAP a lo largo de gradientes físicos continuos como la temperatura o la altitud. Factores de este tipo han sido históricamente poco considerados para la planificación del SNAP a pesar de su prioridad en debates de conservación nacionales e internacionales (Baldi *et al.* 2017).

La distribución de las actividades productivas analizadas -agricultura, silvicultura, ganadería- se ajustó al esquema de aptitud de uso de la tierra propuesto por Lugo y Morris (1982), lo que permitiría monitorear las tendencias de cambio de uso y aportar a mejorar la planificación territorial. Sin embargo, la correspondencia

entre las Zonas de Vida de Holdridge y los tipos de uso de la tierra propuestos por Bran *et al.* (2018), resultó menor que la correspondencia entre las zonas de vida y las ecorregiones, debido a que la distribución espacial de las actividades productivas depende de muchos otros factores además del climático. El cultivo de herbáceas, entre los que se encuentran las actividades de mayor rentabilidad como el cultivo de soja, trigo y maíz, presentó la mayor correspondencia con las zonas de vida, y probablemente el sistema de Holdridge permita analizar patrones de uso y cambio de uso a escalas de mayor detalle que las analizadas en este trabajo. El caso de las plantaciones forestales también requiere desarrollar un enfoque específico. Esa actividad se desarrolla en un amplio rango de condiciones bioclimáticas principalmente en las provincias mesopotámicas. La baja correspondencia entre esa actividad y las zonas de vida se debe en parte a esa variabilidad, pero además a la existencia de diferentes tipos de uso en las zonas de vida donde se desarrollan las plantaciones forestales. Esta actividad presenta además una alta concentración en la ecorregión Selva Paranaense, donde se prevé un importante cambio en las zonas de vida. La aplicación de las zonas de vida para entender los patrones actuales y las tendencias futuras de las plantaciones forestales requiere entender de qué manera los procesos climáticos condicionan la productividad de las plantaciones forestales pero además, cómo inciden sobre la toma de decisiones para el establecimiento de diferentes tipos de uso de la tierra en cada zona de vida.

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

- Abatzoglou JT (2013) Development of gridded surface meteorological data for ecological applications and modelling. *International Journal of Climatology* 33: 121-131.
- Aldiss DT, Edwards EJ (1999). The geology of the Falkland Islands. Tech. Rep.WC/99/10. Nottingham, United Kingdom: British Geological Survey. 136 p.
- Apodaca MJ (2016). Biogeografía histórica y conservación de las provincias Altoandina y Subantártica en W Patagonia (Neuquén, Chubut, Río Negro, Santa Cruz y Tierra del Fuego), Argentina (Tesis Doctoral, Universidad Nacional de La Plata).
- Araújo MB, Rahbek C (2006) How does climate change affect biodiversity? *Science* 313:1396-1397.
- Araújo MB, Peterson AT (2012). Uses and misuses of bioclimatic envelope modeling. *Ecology* 93(7): 1527-1539.
- Arturi MF, Goya JF, (2004). Estructura, dinámica y manejo de los talares del NE de Buenos Aires. In: Arturi, M.F.; Frangi, J.L.; Goya, J.F., eds. *Ecología y manejo de los bosques de Argentina*. [CD-ROM]. La Plata, Argentina: Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. 23 p.
- Bailey RG (1983). Delineation of ecosystem region. *Envir. Mgmt.* 7: 365-373.
- Baker DJ, Hartley AJ, Pearce-Higgins JW, Jones RG, Willis SG (2017). Neglected issues in using weather and climate information in ecology and biogeography. *Diversity and Distributions* 23: 329-340.
- Baldi G, Texeira M, Martin OA, Grau HR, Jobbágy EG (2017). Opportunities drive the global distribution of protected areas. *PeerJ*, 5, e2989.
- Baldi G, Schauman S, Texeira M, Marinaro S, Martin OA, Gandini P, Jobbágy EG (2019). Nature representation in South American protected areas: country contrasts and conservation priorities. *PeerJ*, 7, e7155.
- Barve N, Barve V, Jimenez-Valverde A, Lira-Noriega A, Maher SP, Peterson AT, Soberón, J, Villalobos F (2011). The crucial role of the accessible area in ecological niche modeling and species distribution modeling. *Ecological Modelling* 222: 1810-1819.

- Bastida R, Rodríguez D, Secchi E, da Silva V (2007). Mamíferos acuáticos de Sudamérica y Antártida. Buenos Aires, Argentina: Vázquez Mazzini Editores. 208 p.
- Bedia J, Herrera S, Gutiérrez JM (2013) Dangers of using global bioclimatic datasets for ecological niche modeling. Limitations for future climate projections. *Global and Planetary Change* 107: 1-12.
- Behnke R, Vavrus S, Allstadt A, Albright T, Thogmartin WE, Radeloff VC (2016). Evaluation of downscaled, gridded climate data for the conterminous United States. *Ecological applications*, 26:1338-1351.
- Belda M, Holtanová E, Halenka T, Kalvová J (2014). Climate classification revisited: from Köppen to Trewartha. *Climate research* 59: 1-13.
- Bellard C, Bertelsmeier C, Leadley P, Thuiller W, Courchamp F (2012) Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology letters*, 15:365-377.
- Bianchi AR, Yañez CE, Acuña LR (2005). Base de datos mensuales de precipitaciones del Noroeste Argentino. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Proyecto Riesgo Agropecuario, Convenio Específico. (3): 41.
- Bianchi AR, Cravero SA (2010) Atlas climático digital de la República Argentina. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria: Salta, Argentina. Ediciones INTA.
- Bran DE, Alderete Salas SI, Gaitan JJ (2018). Sistematización de Experiencias del Proyecto Observatorios de Sustentabilidad Rural (INTA Cartera de Proyectos 2013. Proyecto PNNAT1128035). Estación Experimental Agropecuaria Bariloche, INTA.
- Bridgewater PB, Cresswell ID (1999). Biogeography of mangrove and saltmarsh vegetation: implications for conservation and management in Australia. *Mangroves and Salt Marshes* 3(2): 117-125.
- Brown AD, Pacheco S (2006). Propuesta de actualización del mapa ecorregional de la Argentina. En: "Brown, A., U. Martinez Ortiz, M. Acerbi y J. Corcuera (Eds.), La Situación Ambiental Argentina 2005". Buenos Aires, Argentina: Fundación Vida Silvestre Argentina: 28-31.
- Buitrago LG (1999). El Clima de la provincia de Jujuy. II edición. SS de Jujuy, Argentina. Universidad Nacional de Jujuy, Facultad de Ciencias Agrarias, ISBN: 950-721-114-4

- Bureau of Meteorology (1975). General meteorology. Manual of meteorology, part 1. Canberra: Australia: Australian Government Publishing Service. 149 p.
- Burgos JJ (1968). El clima de la Provincia de Buenos Aires en relación con la vegetación natural y el suelo. In: Cabrera, A.L., ed. Flora de la Provincia de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina: Colección Científica INTA. 4(1): 34–97.
- Burgos JJ, Vidal A (1951). Los climas de la República Argentina según la nueva clasificación de Thornthwaite. Meteoros.1.
- Burkart R, Bárbaro NO, Sánchez RO, Gómez DA (1999). Ecorregiones de la Argentina. Buenos Aires Presidencia de la Nación Argentina, Secretaría de Recursos Naturales y Desarrollo Sustentable, Administración de Parques Nacionales. 72 p.
- Buyantuyev A, Wu J (2007). Effects of thematic resolution on landscape pattern analysis. Landscape Ecology 22(1): 7-13.
- Cabrera AL (1953). Esquema fitogeográfico de la República Argentina. Revista del Museo de La Plata 8(33): 87-168.
- Cabrera AL (1971). Fitogeografía de la República Argentina. Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica 14(12): 1–42.
- Cabrera AL (1976). Regiones fitogeográficas argentinas. In: Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería. Vol. 1. Buenos Aires: Editorial Acme.
- Cañadas-Cruz L (1983). El mapa bioclimático y ecológico del Ecuador. Banco Central del Ecuador, Quito.
- Castellanos A, Pérez-Moreau RA (1941). Carta fitogeográfica de la República Argentina, en contribución a la bibliografía botánica argentina. Lilloa 7: 1-497.
- Castellanos A, Pérez-Moreau RA (1944). Los tipos de vegetación de la República Argentina. Tucumán, Argentina. Universidad Nacional de Tucumán, Inst. Est. Geográficos, Fac. Fil. y Letras, Monografía N°4.
- Céspedes VW, Tosi JA (2000). El sistema de zonas de vida. Biocenosis (Especial). 13(1): 2–9.
- Chakraborty A, Joshi PK, Ghosh A, Arendran G (2013). Assessing biome boundary shifts under climate change scenarios in India. Ecological Indicators.

- Chaneton EJ, Mazzia N, Batista WB, Rolhauser A, Ghersa CM (2013). Woody plants invasions in Pampa grasslands: a biogeographical and community assembly perspective. In: Myster, R.W., ed. *Ecotones between forest and grassland*. New York: Springer-Verlag: 115–144.
- Channell R, Lomolino MV (2000). Dynamic biogeography and conservation of endangered species. *Nature* 403(6765): 84-86.
- Chen D, Stow DA, Gong P (2004) Examining the effect of spatial resolution and texture window size on classification accuracy: an urban environment case. *International Journal of Remote Sensing* 25:2177-2192.
- Clements FE, Shelford VE (1939). *Bio-ecology*. John Wiley and Sons, Inc., New York 47: 48-49.
- Daubenmire R (1956). Climate as a determinant of vegetation distribution in eastern Washington and northern Idaho. *Ecological Monographs* 26(2): 131-154.
- De Haro JC (2012). Ecorregión Mar Argentino. In: Morello, J.; Matteucci, S.; Rodriguez, A.F.; Silva, M.E. *Ecorregiones y complejos ecosistémicos argentinos*. Buenos Aires: Orientación Gráfica Editora 16: 655–714.
- De la Cruz JR (1976). *Clasificación de Zonas de Vida de Guatemala*. Basada en el sistema de Holdridge. Guatemala, Instituto Nacional Forestal 25.
- Derguy MR (2017). Clasificación ecológica para la República Argentina a partir del modelo de zonas de vida de Holdridge: mapeo, caracterización y tendencias de cambio. *Cartografías del Sur. Revista de Ciencias, Artes y Tecnología* (6): 140-151.
- Derguy MR, Drozd AA, Martinuzzi S, Frangi JL, Arturi MF (2019a). Effect of climate data uncertainty on ecological land classification: a case study from Argentina. *Climate Research* 78(3): 261-270.
- Derguy MR, Frangi JL, Drozd AA, Arturi MF, Martinuzzi S. (2019b). *Holdridge Life Zone Map Republic of Argentina*. Gen. Tech. Rep. IITF-GTR-51. San Juan, PR: U.S. Department of Agriculture Forest Service, International Institute of Tropical Forestry.
- Drozd AA (2011). *Dinámica espacial y temporal de la estructura del paisaje del Valle de Cuña Pirú y sus alrededores, Misiones, en relación al uso de la tierra* (Tesis

- Doctoral, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata).
- Eastman JR (2012) IDRISI Selva. Worcester, MA: Clark University.
- Eidt RC (1969). The climatology of South America. In: Fittkau, E.J.; Illies, J.; Klinge, H.; Schwabe, G.H., eds. Biogeography and ecology in South America. Dordrecht, Netherlands: Springer-Verlag: 54–81.
- Ellis EC, Ramankutty N (2008). Putting people in the map: anthropogenic biomes of the world. *Frontiers in Ecology and the Environment* 6(8): 439-447.
- Espinal LS, Montenegro EM (1963). Zonas de vida o formación vegetal de Colombia: memoria explicativa sobre el mapa ecológico. Bogotá, Colombia: Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Volumen 13.
- Ewel J, Madriz A, Tosi JA Jr (1968). Zonas de vida de Venezuela: memoria explicativa sobre el mapa ecológico. Caracas, Venezuela: Ministerio de Agricultura y Cría, Dirección de Investigación. 265 p. + map.
- Ewel J, Whitmore JL (1973). The ecological life zones of Puerto Rico and the U.S. Virgin Islands. Res. Pap. IITF-RP-018. San Juan, PR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, International Institute of Tropical Forestry. 72 p. + 1 map.
- Ewel J, Madriz A, Tosi JA (1976). Zonas de vida de Venezuela. Ministerio de Agricultura y Cría. FONAIAP. Ed. Sucre. Caracas.
- Ewel J (1999). Natural systems as models for the design of sustainable systems of land use. *Agroforestry systems*, 45(1-3), 1-21.
- Foro para la Conservación del Mar Patagónico y Áreas de Influencia [FCMAP] (2008). Síntesis del estado de conservación del Mar Patagónico y áreas de influencia Argentina. Puerto Madryn, Edición del Foro.
- Ferreira LJ (2008). Causas y variabilidad de la Depresión del noroeste argentino e impactos sobre los patrones regionales de circulación. Buenos Aires, Argentina: Universidad de Buenos Aires. Tesis doctoral (Ph.D. dissertation).
- Ferreira LJ, Saulo C, Seluchi M (2010). Características de la depresión del noroeste argentino en el período 1997–2003: criterios de selección y análisis estadístico. Ciudad Autónoma de Buenos Aires. *Meteorologica*. 35(1).

- Ferreira NJ, Correia A.A, Ramírez MCV (2004). Synoptic scale features of the tropospheric circulation over tropical South America during the WETAMC TRMM/LBA experiment. *Atmosfera*. 17(1): 13–30.
- Fick SE, Hijmans RJ (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 37: 4302–4315.
- Folguera A, Zárata M (2009). La sedimentación neógena continental en el sector extrandino de Argentina central. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. 64(4): 692–712.
- Frangi JL, Barrera MD, Puigdefábregas J, Yapura P, Arambarri AM, Richter LL (2004). Ecología de los Bosques de la Tierra del Fuego. In: Arturi, M.F.; Frangi, J.L.; Goya, J.F., eds. *Ecología y manejo de los Bosques de Argentina*. La Plata, Argentina. EDULP (Editorial Universidad Nacional de La Plata). Prefacio+ Prólogo+ 20 Capítulos. Chapter 18: 1–88. Presentación Multimedia.
- Frangi JL, Pérez C, Martiarena R, Pinazo M, Martínez Pastur G, Brown AD, Peri PL, Ceballos DS (2015). Aspectos ecológicos y ambientales de los bosques nativos y plantaciones forestales en la Argentina: una visión panorámica y conceptual. En: Casas, R.R.; Albarracín, G.F., eds. *El deterioro del suelo y del ambiente en la Argentina*. Buenos Aires. FECIC, INTA. Editorial Fundación para la Educación, la Ciencia y la Cultura, I. 4: 365–424.
- Frenguelli J (1941). Rasgos principales de la Fitogeografía Argentina. La Plata. *Revista del Museo de La Plata, III Botánica*. 13: 5–181.
- Fundación Vida Silvestre Argentina [FVSA] (2019). https://www.vidasilvestre.org.ar/nuestro_trabajo/areas_protegidas/areas_naturales_protegidas/. (30 de septiembre de 2019)
- Godoy Bürki AC (2016). Efectos del cambio climático sobre especies de plantas vasculares del sur de los Andes Centrales: un estudio en el noroeste de Argentina (NOA).
- Giraud AR, Arzamendia V (2018). Descriptive bioregionalisation and conservation biogeography: what is the true bioregional representativeness of protected areas?. *Australian Systematic Botany* 30(6): 403–413.

- Greenacre M, Primicerio R (2013). *Multivariate data analysis for ecologists*. Foundation BBVA, Madrid.
- Hartshorn G (1977). *Criterios para la clasificación de bosques y la determinación del uso potencial de tierras en Paraguay*. FAO, Informe Técnico no. 8, Asunción, Paraguay.
- Hartshorn GS, Nicolait L, Hartshorn L, Bevier G, Brightman R, Cal J, Cawitch A, Davidson W, DuBois R, Dyer C, Gibson J, Hawley W, Leonard J, Nicolait R, Weyer D, White H, Wright C (1984). *Belize Country Environmental Profile: A Field Study*. Tropical Science Center, San José, Costa Rica.
- Hauman L (1920). *Ganadería y Geobotánica en la Argentina*. *Revista del Centro de Estudios Agronómicos y Veterinarios (Buenos Aires)* 102:45–65
- Hauman L (1931). *Esquisse phytogéographique de l'Argentine subtropicale et de ses relations avec la Geobotanique sudaméricaine*. *Bull Soc R Bot Belg* 64: 20–64
- Haylock MR, Hofstra N, Tank AK, Klok EJ, Jones PD, New M (2008) *A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006*. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113 (D20).
- Hijmans RJ, Cameron SE, Parra JL, Jones PG, Jarvis A (2005). *Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas*. *International Journal of Climatology* 25: 1965-1978.
- Hoffmann JAJ (1992). *The continental atmospheric pressure and precipitation regime of South America*. *Erdkunde*. 46: 42–51.
- Holdridge LR (1947). *Determination of plant world formations from simple climatic data*. *Science*. 105 (2727): 367–368.
- Holdridge LR (1959). *Simple method for determining potential evapotranspiration from temperature data*. *Science*. 130(3375): 572–572.
- Holdridge LR (1962a). *Mapa ecológico de Honduras*. Informe Oficial Misión 105 a Honduras. Washington, DC: Organization of American States.
- Holdridge LR (1962b). *Mapa ecológico de Nicaragua*. Managua, Nicaragua: United States Agency for International Development.
- Holdridge LR (1967) *Life Zone ecology*. Costa Rica. San José, Tropical Science Center.

- Holdridge LR (1969). Estudio ecológico de los bosques de la región oriental del Paraguay. Informe del Ministerio de Agricultura y Ganadería, Gobierno de Paraguay, Asunción: 19 p.
- Holdridge LR (1972). Life zones in Haiti. Carte Ecologie d'Haiti, OAS, Haïti.
- Holdridge LR (1975). Zonas de Vida Ecológicas de El Salvador. Memoria Explicativa. Dirección General de Recursos Naturales Renovables. Documento de Trabajo No. 6, FAO. San Salvador. 98 pp.
- Holdridge LR (1979). Ecología basada en las zonas de vida. IICA, San José, Costa Rica: 216 p. (Translation to Spanish of the first revised edition: Holdridge, L.R. 1967. Life zone ecology. San José, Costa Rica: Tropical Science Center.
- Holmberg EL (1898). La flora de la República Argentina. Segundo Censo de la República Argentina 1:385–474
- Instituto Geográfico Nacional [IGN] (2016). Límites, superficies y puntos extremos. <http://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geografia/DatosArgentina/LimitesSuperficiesyPuntosExtremos>. (28 de octubre de 2019).
- International Institute for Applied Systems Analyses [IIASA] (1989). Holdridge life zone global map. New York: Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/metadata.show?currTab=simple&id=1006>. (30 de octubre de 2018).
- Iriondo MH 1987. Geomorfología y cuaternario de la Provincia de Santa Fe (Argentina). D'Orbignyana. 4: 1–54.
- Iturraspe R, Sottini R, Schroede C, Escobar J (1989). Generación de información hidroclimática en Tierra del Fuego. Hidrología y variables climáticas del territorio de Tierra del Fuego, información básica. Argentina. Ushuaia. CONICET-CADIC, Contribución Científica. 7: 4–170.
- Jia M, Liu D, Song K, Wang Z, Ren C (2012). Mapping biomes of Australia based on the Holdridge life zone model. In 2012 International Conference on Computer Vision in Remote Sensing, IEEE 362-365 pp.

- Jiménez-Saa H (1993). Anatomía del sistema de ecología basada en zonas de vida de L.R. Holdridge. Curso internacional de ecología basada en zonas de vida, San José, CR. 22 febrero-13 marzo.
- Jones DA, Wang W, Fawcett R (2009). High-quality spatial climate data-sets for Australia. *Australian Meteorological and Oceanographic Journal* 58: 233.
- Karger DN, Conrad O, Böhner J, Kawohl T, Kreft H, Soria-Auza RW, Zimmermann NE, Linder HP, Kessler M (2017). Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Scientific data* 4: 170-122.
- Keenan T, Maria Serra J, Lloret F, Ninyerola M, Sabate S (2011). Predicting the future of forests in the Mediterranean under climate change, with niche-and process-based models: CO2 matters!. *Global change biology* 17(1): 565-579.
- Kirilenko AP, Solomon AM (1998). Modeling dynamic vegetation response to rapid climate change using bioclimatic classification. *Climatic Change*. 38(1): 15–49.
- Kousky VE (1988). Pentad outgoing long wave radiation climatology for the South American sector. *Revista Brasileira de Meteorologia*. 3: 217–231.
- Kousky VE, Gan MA (1981). Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical South Atlantic. *Tellus*. 33(6): 538–551.
- Krankina ON, Dixon RK, Kirilenko AP, Kobak KI (1997). Global climate change adaptation: examples from Russian boreal forests. *Climatic Change*. 36(1–2): 197–215.
- Kühn F (1930). *Geografía de la Argentina*. Ed. Labor, Buenos Aires
- Lamas AM, Maio S (2011). El clima Argentino. In: Murphy, G.M.; Hurtado, R.H., eds. Editorial Facultad de Agronomía, UBA, CABA. *Agrometeorología*: 385–407.
- Lechner AM, Rhodes JR (2016) Recent progress on spatial and thematic resolution in landscape ecology. *Current Landscape Ecology Reports* 1: 98-105.
- Lenters JD, Cook KH (1997). On the origin of the Bolivian high and related circulation features of the South American climate. *Journal of the Atmospheric Sciences*: 656–678.
- Lichtenstein ER (1980). *La Depresión del noroeste Argentino*. Argentina. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires, Departamento de Ciencias de la Atmosfera, Ciudad Universitaria (1428). 133 p. Ph.D. dissertation.

- Liebmann B, Marengo JA (2001). The seasonality and interannual variability of rainfall in the Brazilian Amazon Basin. *Journal of Climate*. 14: 4308–4318.
- Lorentz P (1876). Cuadro de la Vegetación de la República Argentina. In: Napp R (ed) *La República Argentina*. Buenos Aires, pp 77–136
- Lugo AE, Brown SL, Dodson R, Smith TS, Shugart HH (1999). The Holdridge life zones of the conterminous United States in relation to ecosystem mapping. *Journal of Biogeography*. 26(5): 1025–1038.
- Lugo A, Morris G (1982). Los sistemas ecológicos y la humanidad. OEA, Washington, D. C. 23, 49-61.
- Marengo JA, Wagner RS, Saulo C (2002). Climatology of low-level jet east of the Andes as derived from the NCEP reanalyses. XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Foz de Iguaçu-PR. XII: 885–891.
- Matteucci S (2012). Ecorregión altos Andes. In: Morello, J.; Matteucci, S.; Rodríguez, A.F.; Silva, M., eds. *Ecorregiones y complejos ecosistémicos argentinos*. 1ª Edición. Buenos Aires: Orientación Gráfica Editora: 1: 1–86.
- Matteucci SD, Silva ME, Rodríguez AF (2016). Clasificaciones de la tierra: ¿provincias fitogeográficas, ecorregiones o paisajes?. *Fronteras* 14:1–16.
- Matteucci SD, Colma A (1982). Metodología para el estudio de la vegetación. Washington, DC: Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos, Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico. Serie Biología, monografía N° 22. 163 p.
- McColl RW (2005). *Encyclopedia of world geography*. 1. Infobase Publishing. 961 p.
- Mendoza F, Chévez M, González B (2001). Sensibilidad de las zonas de vida de Holdridge en Nicaragua en función del cambio climático. *Revista Forestal Centroamericana*. 33: 17-22.
- Merriam CH (1890). Results of a biological survey of the San Francisco Mountain region and desert of the Little Colorado in Arizona. *North American Fauna*, 1-4.
- Metzger MJ, Bunce RG, Jongman RH, Sayre R, Trabucco A, Zomer R (2013) A high-resolution bioclimate map of the world: a unifying framework for global biodiversity research and monitoring. *Global Ecology and Biogeography* 22: 630-638.

- Montroull NB, Saurral RI, Camilloni IA, Grimson R, Vasquez P (2013). Assessment of climate change on the future water levels of the Iberá wetlands, Argentina, during the twenty-first century. *International journal of river basin management* 11(4): 401-410.
- Morello J (1986). *Perfil ecológico de Sudamérica*. Barcelona, Spain: Instituto de Cooperación Iberoamericana (ICI), Ediciones Cultura Hispánica. 84 p.
- Morello J, Matteucci SD (2000) Singularidades territoriales y problemas ambientales de un país asimétrico y terminal. *Realidad Económica* 169: 70-96.
- Morello J, Matteucci SD, Rodriguez AF, Silva ME (2012). *Ecorregiones y complejos ecosistémicos de Argentina*. Buenos Aires: Orientación Gráfica Editora.
- Murphy GM (2008). *Atlas agroclimático de la Argentina*. Buenos Aires: Editorial Facultad Agronomía. UBA: 130 p.
- Nasir SM, Afrasiyab M, Athar M (2015). Application of Holdridge Life Zones (HLZ) in Pakistan. *Pakistan Journal of Botany* 47: 359-366.
- Natenzon CE, Bachaman LI, Gentile EE, Miraglia M, Belfonte C, Maldonado P, Massaldi Fuch J, Pale G (1997). Evaluación de clasificaciones biogeográficas. Una propuesta para el uso de información secundaria. Ponencia publicada en actas del 6to. Encuentro de Geógrafos de América Latina-Territorios en Redefinición. Lugar y Mundo en América Latina. FFyL, UBA. Buenos Aires, 17 al 21 de Marzo.
- Neiff JJ (2004). *Bosques fluviales de la cuenca del Paraná. Ecología y manejo de los bosques de Argentina*. La Plata, Argentina.
- New M, Lister D, Hulme M, Makin I (2002). A high-resolution data set of surface climate over global land areas. *Climate research* 21: 1-25.
- Nori J, Moreno Azócar DL, Cruz FB, Bonino MF, Leynaud GC (2016). Translating niche features: Modelling differential exposure of Argentine reptiles to global climate change. *Austral Ecology* 41:367-375.
- Odum EP (1945). The concept of the biome as applied to the distribution of North American birds. *The Wilson Bulletin* 57(3): 191-201.
- OEA (1967). *Reconocimiento y evaluación de los recursos naturales de la República Dominicana* (No. 333.7097293 O-687r). Washington, US.

- Openshaw S (1984). The Modifiable Areal Unit problem. CATMOG, Geo-abstracts. Norwich, UK .
- Otley H, Munro G, Clausen A, Ingham B (2008). Falkland Islands—state of the environment report. Stanley, Falkland Islands: Falkland Islands Government and Falklands Conservation.
- Oyarzabal M, Clavijo J, Oakley L, Biganzoli F, Tognetti P, Barberis I, Oesterheld M (2018). Unidades de vegetación de la Argentina. *Ecología austral*, 28(1), 040-063.
- Pacheco S, Malizia LR, Brown AD. (2010). La provisión de agua como Servicio Ambiental de la Reserva de Biosfera de las Yungas, Argentina. *Reservas de la Biósfera, su contribución a la provisión de servicios de los ecosistemas. MAB–UNESCO.*
- Papadakis J (1977). Mapa ecológico abreviado de la República Argentina. Rural FIAT, Buenos Aires, Argentina). *Anuario 78: 10-79.*
- Parodi LR (1934). Las plantas indígenas no alimenticias cultivadas en la Argentina. *Rev Argent Agron 1:165–212*
- Parodi L (1942). ¿Por qué no existen bosques naturales en la llanura bonaerense si los árboles crecen en ella cuando se los cultiva? *Revista del Centro de Estudiantes de Agronomía, UNLP. 30: 387–390.*
- Parodi LR (1945). Las regiones fitogeográficas argentinas y sus relaciones con la industria forestal. *Plants and Plant Science in Latin America*, pp 127–132.
- Parodi LR (1964). Las regiones fitogeográficas argentinas. *Enciclopedia argentina de agricultura y ganadería, ACME SACI, Bs. As 3: 1-14.*
- Paruelo JM, Guerschman JP, Verón SR (2005). Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. *Ciencia hoy, 15(87), 14-23.*
- Paruelo JM, Guerschman JP, Piñeiro G, Jobbagy EG, Verón SR, Baldi G, Baeza S (2006). Cambios en el uso de la tierra en Argentina y Uruguay: marcos conceptuales para su análisis. *Agrociencia-Sitio en Reparación 10(2): 47-61.*
- Peterson AT, Nakazawa Y (2008) Environmental data sets matter in ecological niche modelling: an example with *Solenopsis invicta* and *Solenopsis richteri*. *Global ecology and Biogeography 17:135-144.*

-
- Piola AR (2008). Oceanografía. In: Foro para la conservación del Mar Patagónico y áreas de influencia (FCMAP). 2008. Síntesis del estado de conservación del Mar Patagónico y áreas de influencia. Argentina, Puerto Madryn. Edición del Foro. <http://www.marpatagonico.org>.
- Piola AR, Matanó RP (2001). The South Atlantic western boundary currents Brazil/Falkland (Malvinas) currents. In: Steele, J.H.; Thorpe, S.A.; Turekian, K.K., eds. Encyclopedia of ocean sciences. Waltham, MA: Academic Press.1: 340–349.
- Placci G, Holz S (2004). Patrón de paisaje de bosques del Chaco Oriental. Ecología y manejo de los bosques de Argentina. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata.
- Pliscoff P, Luebert F, Hilger HH, 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.
- Pontius RG (2000) Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. *Photogrammetric engineering and remote sensing* 66: 1011-1016.
- Pontius Jr. RG, Shusas E, McEachern M (2004) Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 101: 251-268.
- Pontius Jr. RG, Suedmeyer B (2004) Components of agreement between categorical maps at multiple resolutions. *Remote sensing and GIS accuracy assessment* 233-251.
- Power C, Simms A, White R (2001) Hierarchical fuzzy pattern matching for the regional comparison of land use maps. *International Journal of Geographical Information Science* 15: 77-100.
- Prentice IC, Cramer W, Harrison SP, Leemans R, Monserud RA, Solomon AM (1992). Special paper: a global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate. *Journal of biogeography*, 117-134.

-
- Ramos VA (1999a). Las provincias geológicas del territorio argentino. *Geología Argentina*. 29(3): 41–96.
- Ramos VA (1999b). Rasgos estructurales del territorio argentino. Caminos, R., ed. *Geología Argentina*. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Anales. 29(24): 715–784.
- Ramos VA (2007). La formación de las montañas y los Andes. In: Folguera, A.; Ramos, V.A.; Spagnuolo, M., coords. *Introducción a la geología*. Buenos Aires: EUDEBA. 8: 89–111.
- Ramos VA, Riccardi AC, Rolleri OE (2004). Límites naturales de la Patagonia. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. 59(4): 785–786.
- R Development, C. O. R. E. TEAM (2007) R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria. Internet: <http://www.R-project.org>.
- Ribichich AM (2002). El modelo clásico de la fitogeografía de argentina: un análisis crítico. *Interciencia* .27: 669–675.
- Rovereto C (1914). Los estratos araucanos y sus fósiles. *Anales del Museo Nacional de Historia Natural de Buenos Aires*.
- Salk C, Fritz S, See L, Dresel C, McCallum I (2018) An Exploration of Some Pitfalls of Thematic Map Assessment Using the New Map Tools Resource. *Remote Sensing* 10: 376.
- Saulo C, Ferreira L, Nogués-Paegle J, Seluchi M, Ruiz J (2010). Land atmosphere interactions during a northwestern Argentina low event. *Journal of the American Meteorological Society*: 2481–2498. <https://doi.org/10.1175/2010MWR3227.1>.
- Saulo C, Seluchi ME, Nicolini M (2004). A case study of a Chaco low level jet event. *Monthly Weather Review*. 13(11): 2669–2683.
- Scarano FR, Ceotto P (2015). Brazilian Atlantic forest: impact, vulnerability, and adaptation to climate change. *Biodiversity and Conservation* 24(9): 2319-2331.
- Schirone B, Radoglou K, Vessella F (2016). Conservation and restoration strategies to preserve the variability of cork oak *Quercus suber*-a Mediterranean forest species-under global warming. *Climate Research* 71:171-185.

- Schwerdtfeger W (1976). Climates of Central and South America. In: Schwerdtfeger, W., ed., World survey of climatology. New York: Elsevier Scientific Publishing Company. 145 p.
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación [SAyDS] (2014). Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático. “Cambio Climático en Argentina; Tendencias y Proyecciones” (Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera). Buenos Aires, Argentina.
- Seluchi ME, Marengo A (2000). Tropical-midlatitude exchange of air masses during summer and winter in South America: climatic aspects and examples of intense events. *International Journal of Climate*. 20: 1167–1190.
- Shannon CE, Weaver W (1963). *The Mathematical Theory of Communication* (Urbana: University of Illinois Press) 125 pp
- Sistema Federal de Áreas Protegidas [SiFAP] (2019). <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/tierra/protegida>. (30 septiembre de 2019)
- Smith JB, Lazo JK (2001). A summary of climate change impact assessments from the US Country Studies Program. *Climatic Change* 50(1-2): 1-29.
- Spector S (2002). Biogeographic crossroads as priority areas for biodiversity conservation. *Conservation Biology* 16(6): 1480-1487.
- SRTM 2001. Servicio Geológico de Estados Unidos. Mission overview. *Frequenz*. 55: 3–4. <http://earthexplorer.usgs.gov/>
- Srur AM, Villalba R, Rodríguez-Catón M, Amoroso MM, Marcotti E (2018). Climate and *Nothofagus pumilio* Establishment at Upper Treelines in the Patagonian Andes. *Frontiers in Earth Science*, 6, 57.
- Stillwell J, Daras K, Bell M (2018). Spatial aggregation methods for investigating the MAUP effects in migration analysis. *Applied Spatial Analysis and Policy* 11(4): 693-711.
- Suárez ML, Kitzberger T (2010). Differential effects of climate variability on forest dynamics along a precipitation gradient in northern Patagonia. *Journal of Ecology* 98: 1023-1034.

- Tapiador FJ, Moreno R, Navarro A, Sánchez JL, García-Ortega E (2019). Climate classifications from regional and global climate models: Performances for present climate estimates and expected changes in the future at high spatial resolution. *Atmospheric Research* 228: 107-121.
- Tassara A, Yáñez G (2003). Relación entre el espesor elástico de la litosfera y la segmentación tectónica del margen andino (15–47° S). *Revista Geológica de Chile*. 30(2): 159–186.
- Taylor KE, Stouffer RJ, Meehl GA (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93(4): 485-498.
- Tosi JA Jr. (1960). Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA Zona Andina. Zonas de vida natural en el Perú. Memoria explicativa sobre el Mapa ecológico del Perú.
- Tosi JA Jr. (1969). Mapa ecológico de Costa Rica: según la clasificación de zonas de vida del mundo de Holdridge. Escala 1:750.000. Centro Científico Tropical, San José, Costa Rica.
- Tosi JA Jr. (1971). Zonas de vida de Panamá: una base ecológica para investigaciones silvícolas e inventariación forestal en la República de Panamá. Roma, Italia: Programa de las Naciones Unidas para el desarrollo.
- Tosi JA, Unzueta O, Holdridge LR, González A (1975). Mapa ecológico de Bolivia. MACA, La Paz.
- Tosi JA Jr. (1983). Provisional life zone map of Brazil at 1:5.000.000 scale. San Jose, PR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Institute of Tropical Forestry. 1 map + 16 p.+ 9 p. appendix.
- Tosi J, Hartshorn G (1978). Mapa ecológico de El Salvador. Sistemas de zonas de vida del Dr. LR Holdridge (No. 728.4 T714). Ministerio de Agricultura y Ganadería de El Salvador, San Salvador (El Salvador) CATIE, San Salvador (El Salvador).
- Tres A (2016). Classificação climática para o Brasil segundo as zonas de vida de Holdridge. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Dissertação (Mestrado). Defesa: Curitiba. 89 p.

- Tuhkanen S (1992). The climate of Tierra del Fuego from a vegetation geographical point of view and its ecoclimatic counterparts elsewhere. *Acta Bot. Fenn.* 145: 1-65.
- Unzueta Q (1975). Mapa Ecológico de Bolivia. Memoria explicativa. República de Bolivia. Ministerio de Asuntos Campesinos y Agropecuarios. División de Suelos, Riego e Ingeniería. 312 p.
- Vazquez P, Zulaica L, Requesens E (2016). Análisis ambiental de los cambios en el uso de las tierras en el partido de Azul (Buenos Aires, Argentina). *Agriscientia*, 33(1), 15-26.
- Veblen TT, Kitzberger T, Villalba R (2004). Nuevos paradigmas en ecología y su influencia sobre el conocimiento de la dinámica de los bosques del sur de Argentina y Chile. *Ecología y Manejo de los Bosques de Argentina*. La Plata, Argentina, EDULP. Presentación multimedia. ISBN 950-34-0307-3.
- Vera C, Higgins W, Amador J, Ambrizzi T, Garreaud R, Gochis D, Gutzle D, Lettenmaier D, Marengo JA, Mechoso CR, Nogues-Paegle J, Silva Dias PL, Zhang C (2006). A unified view of the american monsoon systems. *Journal of Climate*. 19: 4977–5000.
- Vervoorst F (1967). Las comunidades vegetales de la depresión del Salado. Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, La vegetación de la República Argentina. Serie fitogeográfica 7. 259 p.
- Volante JN (2014). Dinámica y consecuencias del cambio en la cobertura y el uso del suelo en el Chaco Semi-Árido.
- Volante JN, Mosciaro MJ, Poclava MCM, Vale LM, Castrillo SA, Sawchik J, Tiscornia G, Fuente M, Maldonado I, Vega A, Trujillo R, Cortéz L, Paruelo J (2015). Expansión agrícola 2000-2010 en Argentina, Bolivia, Paraguay, Uruguay y Chile: Caracterización espacial mediante series temporales de índices de vegetación. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 41(2), 1.
- Wieder RK, Vitt DH, Benscoter BW (2006). Peatlands and the boreal forest. *Ecological Studies*. 188: 1689–1699.
- Woelken K (1954). Algunos aspectos sinópticos de la lluvia en la Argentina. *Meteoros*. 327–366.

- Yan Y, Wang YC, Feng CC, Wan PHM, Chang KTT (2017) Potential distributional changes of invasive crop pest species associated with global climate change. *Applied geography* 82: 83-92.
- Yao X, Fu B, Lü Y, Sun F, Wang S, Liu M (2013) Comparison of four spatial interpolation methods for estimating soil moisture in a complex terrain catchment. *PloSone* 8: e54660.
- Yates DN, Kittel TG, Cannon RF (2000). Comparing the correlative Holdridge model to mechanistic biogeographical models for assessing vegetation distribution response to climatic change. *Climatic Change* 44(1-2): 59-87.
- Yue T, Liu J, Jørgensen SE, Gao Z, Zhang S, Deng X (2001). Changes of Holdridge life zone diversity in all of China over half a century. *Ecological Modelling*. 144(2): 153–162.
- Zak MR, Cabido M, Cáceres D, Díaz S (2008) What drives accelerated land cover change in central Argentina? Synergistic consequences of climatic, socioeconomic, and technological factors. *Environmental Management* 42 :181-189.