



UNIVERSIDAD DE CHILE

**Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Escuela de Pregrado
Carrera de Geografía**

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD BIOCLIMÁTICA PARA EL AÑO 2050 EN LA REGIÓN DE TARAPACÁ MEDIANTE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PROPUESTOS POR EL QUINTO INFORME DEL IPCC Y MODELOS DE CIRCULACIÓN GLOBAL DE MUY, MUY ALTA RESOLUCIÓN.

Memoria para optar al Título profesional de Geógrafo

IGNACIO ANDRÉS NÚÑEZ HIDALGO

Profesor Guía: Pablo Sarricolea Espinoza

SANTIAGO – CHILE

Marzo 2016

“Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de Cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y Modelos de Circulación Global de muy, muy alta resolución”.

Dedicatoria

A la contribución y crecimiento del conocimiento en este país,

Agradecimientos

En la presente escritura quiero agradecer a todas las personas que formaron parte de mi entorno y apoyo durante estos años en que lleve a cabo mi formación profesional como geógrafo en la Universidad de Chile, tanto en actividades docentes como extracurriculares y formativas.

Quiero agradecer el apoyo de mi familia, mis padres Cecilia y Tulio que me incitaron a estudiar una carrera universitaria que llenase mis energías y emociones, permitiéndome ser una mejor persona y un mejor profesional. Del cual espero poder retribuir, mediante el apoyo directo a la generación del conocimiento y de nuevas generaciones de profesionales en el país. También quiero agradecer a mis hermanos Lucía, y Pablo, por enseñarme aspectos de la vida que van más allá de las enseñanzas paternas, y a mi hermano, Claudio por emocionarme respecto del estudio de la ecología.

A mi Pareja, Claudia, por creer en mí. Y ser un pilar esencial, aconsejándome y soportando mis infinitas palabras, preocupaciones e inseguridades. Enseñándome a abordar mis problemas desde una perspectiva mucho más humana y consciente de quienes me rodean.

A mis amigos Mario Carvajal, Nicolás Montoya, Oliver Ojeda, David Henríquez y Alberto Alaniz, por aconsejarme, guiarme y demostrarme que puedo contar con su lealtad siempre y más allá de lo profesional. Y a mis compañero de laboratorio, que pese a no haber compartido mucho con ellos les agradezco sinceramente su interés y ganas por escucharme y ayudarme.

A los profesores Andrea Cabezas, Patricio Pliscoff y Alexis Vásquez, por despertar mi curiosidad respecto de los estudios que permitieron el comienzo y elaboración de esta memoria, junto a mi preocupación por el estado de los ecosistemas y la biota a nivel mundial.

También quiero agradecer a mi profesor guía Pablo Sarricolea, quien siempre se comportó con extrema humildad y respeto. Aconsejándome sabiamente y dejando a veces de lado muchas de sus actividades para asistirme, siempre de manera desinteresada y sincera. Y también por incitarme a seguir estudios de postgrado una vez finalizado este proceso.

Finalmente quiero agradecer al Centro de Estudios de Humedales, quienes me recibieron para trabajar en conjunto con ellos durante el pasado mes de diciembre, dándome la oportunidad de conocer y entender el Altiplano andino desde un enfoque íntegro.

RESUMEN

El estudio de la distribución de las especies en el espacio geográfico ha sido uno de los grandes puntos neurálgicos en el campo de la biogeografía desde que el ser humano conoce distintas especies (ZIMMERMAN *et al.*, 2010). Los primeros acercamientos delimitaban la distribución en base a registros observados, sesgando en base a lo netamente visto. En la actualidad, este busca ser correspondido mediante la utilización de metodologías digitales, como lo son los modelos de distribución de especies, porque tienen la capacidad de identificar patrones en el territorio (tanto presentes como futuras) mediante la intersección de puntos de presencia con diversas coberturas, a través de la utilización de variados algoritmos matemáticos (BARROWS *et al.*, 2010; CHEFAOUI, 2011; PLISCOFF & FUENTES, 2011). Estas metodologías han sido aplicadas tanto a nivel de especies, como de ecosistemas (DEBLAUWE *et al.*, 2008; PLISCOFF *et al.*, 2014), dando resultados robustos, y confiriéndoles la capacidad de reforzar la solución de preguntas ecológicas relevantes. En este ámbito, los actuales desafíos por lograr mantener los ecosistemas globales se han visto incrementados debido a que ha disminuido su extensión y diversidad frente a impactos antrópicos que los han afectado (CBD, 1992; GANN & LAMB, 2006; UICN, 2014), el efecto mundial del cambio climático es uno de estos efectos, y es innegablemente producido por el hombre (IPCC, 2014). Los ecosistemas desérticos han demostrado ser muy frágiles a los efectos acelerados, debido a que sus umbrales de tolerancia están limitados a condiciones climáticas muy específicas (JAKSIC *et al.*, 1997; KEFI *et al.*, 2007). En esta memoria se proyectaron los pisos vegetales de PLISCOFF & LUEBERT (2006) que corresponden a la clasificación vigente de ecosistemas terrestres Chilenos desde el año 2008. En la región de Tarapacá, bajo escenarios de cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC al año 2050. Los resultados entregan interesantes perspectivas respecto de la distribución y configuración ecosistémica de la región. Se observa un aumento altitudinal de los ecosistemas hiper-áridos que conlleva la desertificación de los pisos de altura, seguido de un efecto contrario para las zonas más bajas, donde ocurren situaciones que le entregan un carácter transitorio hacia condiciones menos áridas a una de las zonas que actualmente presenta uno de los mayores grados de aridez mundial. Además, se proyectó la distribución de la especie *Deyeuxia curvula*, que es una gramínea perteneciente al pajonal azonal de los humedales Altoandinos de la región. Esta es una especie que se encuentra constituyendo una de las fuentes alimenticias principales del ganado camélido en el Altiplano Andino (CASTELLARO *et al.*, 2004), y su salud determinará la disponibilidad de alimento para estos. Al igual que con los ecosistemas, se evidencia una reducción en la concentración de la especie dentro del Altiplano Andino Chileno, corroborando la degradación integral sobre la biodiversidad para esta región.

Palabras clave: *cambio climático, ecosistemas, biodiversidad, downscaling.*

Tabla de contenidos

1. Introducción	11
1.1 Planteamiento del problema	12
1.2 Objetivos e hipótesis	15
2. Área de estudio	16
3. Marco teórico	22
3.1 Estado del arte en la conservación de la biodiversidad	23
3.1.1 Formas de conservación de la biodiversidad en el mundo	24
3.1.2 Estructura y formas de conservación en Chile	25
3.2 Teoría de nichos ecológicos	28
3.2.1 Nicho fundamental y nicho realizado	30
3.2.2 Cuantificación de nichos ecológicos	31
3.3 Modelos de distribución de especies	31
3.3.1 ¿Qué es un modelo de distribución de especie?	31
3.3.2 ¿Para qué son necesarios los modelos de distribución de especie? ..	33
3.3.3 ¿Qué tipos de modelos de distribución de especie existen?	33
3.3.4 Limitaciones y consideraciones de los modelos	36
3.3.5 Formas de validar modelos de distribución de especie	39
3.4 Cambio climático	40
3.4.1 ¿Qué se sabe del cambio climático y por qué es importante estudiarlo? 40	
3.4.2 Modelos de circulación global y regional	44
3.4.3 Tipos y métodos de downscaling existentes	45
3.4.4 Estudios que han logrado niveles de downscaling a muy, muy altas resoluciones.	46

3.4.5	Tipos y aplicaciones de los modelos de circulación en Chile.....	46
4.	Marco metodológico.....	48
4.1	Variables bioclimáticas.....	48
4.2	Ensamble de Modelos GCM.....	51
4.3	Selección de escenarios RCP.....	53
4.4	Selección de variables bioclimáticas.....	54
4.5	Obtención de variables en formato raster.....	62
4.6	Obtención de residuos.....	67
4.7	Modelos de distribución de especies.....	68
4.7.1	Modelando la distribución de especies con MAXENT.....	68
4.7.2	Pisos vegetacionales.....	73
4.7.3	Registros de presencias: <i>Deyeuxia curvula</i>	76
4.7.4	Validación y ajuste de los modelos.....	78
5.	Resultados.....	82
5.1	Análisis de coberturas sometidas a procesos de downscaling.....	82
5.1.1	Temperatura mínima del mes más frío (BIO6).....	85
5.1.2	Temperatura media del trimestre más seco (BIO9).....	87
5.1.3	Temperatura media del trimestre más frío (BIO11).....	89
5.1.4	Precipitación anual (BIO12).....	91
5.1.5	Precipitación del mes más húmedo (BIO13).....	92
5.1.6	Precipitación del trimestre más húmedo (BIO16).....	94
5.1.7	Precipitación del trimestre más cálido (BIO18).....	95
5.2	Análisis de cambio de ecosistemas vegetales.....	101
5.2.1	Ajuste de los modelos de línea base a los pisos vegetales.....	101

5.2.2	Variación de los pisos vegetales frente a escenarios de cambio climático.....	104
5.2.2.1	Pisos del bosque espinoso	104
5.2.2.2	Pisos del desierto absoluto.....	107
5.2.2.3	Pisos del matorral bajo de altitud	110
5.2.2.4	Pisos del matorral bajo desértico	112
5.2.2.5	Pisos del matorral desértico	114
5.3	Variabilidad en la modelación y proyección de la especie <i>Deyeuxia curvula</i>	116
6.	Discusiones	119
7.	Conclusiones	121
8.	Referencias Bibliográficas	123
9.	Anexos	132

Índice de Figuras

Figura N° 1: Presentación general del área de estudio	17
Figura N° 2: Principales estructuras geomorfológicas presentes en el área de estudio....	20
Figura N° 3: Nicho fundamental y nicho realizado, el nicho fundamental es la sumatoria entre G_1 y G_0	30
Figura N° 4: Funcionamiento general de los Modelos de Distribución de Especies	32
Figura N° 5: Cuadro de comparación que ilustra la mejora en la resolución de píxel en imágenes de Modelos de Circulación Global	37
Figura N° 6: Curva ROC	39
Figura N° 7: Aumento de temperaturas globales desde el año 1850 al año 2000. El color café sugiere las temperaturas terrestres, el azul sugiere las temperaturas oceánicas y el negro sugiere la temperatura combinada de ambas	40
Figura N° 8: Concentraciones mundiales de GEI observados desde el año 1850 al año 2000	41
Figura N° 9: Intensidad comparativa en los escenarios RCP medida en W/m^2 propuestos por el IPCC	42
Figura N° 10: Curva de concentración RCP expresada giga toneladas de emisiones previstas de CO_2 y su comparación respecto de los escenarios del cuarto informe del IPCC	43
Figura N° 11: Procedimiento de obtención de Anomalías y nuevas capas climáticas para modelar escenarios de cambio climático futuro en Chile.....	50
Figura N° 12: Aplicación de formato condicional a variables de precipitación sometidas al método de anomalías de BUYTAERT et al. (2008).....	51
Figura N° 13: Comparación entre Escenarios GCM HadGEM_2 y CSIRO_Mk3_6 para el escenario RCP 4.5 al año 2050	52
Figura N° 14: esquema metodológico en la selección de variables bioclimáticas.....	54
Figura N° 15: Variables independientes (X) utilizadas en el procedimiento de RLM	59
Figura N° 16: Calibración de variables bioclimáticas mediante herramienta CON.....	66
Figura N° 17: Procedimiento de obtención de residuos.....	67

Figura N° 18: Cuadro comparativo del desempeño de MAXENT respecto de once distintos algoritmos para modelar la distribución de especies.....	69
Figura N° 19: Distribución de la vegetación en extensiones correspondientes a los pisos del Matorral bajo desértico y el Matorral desértico.....	75
Figura N° 20: Condición azonal de la especie <i>D. curvula</i>	77
Figura N° 21: Ejemplo de curva ROC y ajuste AUC para un piso del Bosque espinoso bajo el escenario RCP 4.5 al año 2050 en el área de estudio.....	80
Figura N° 22: Contraste espacial entre tamaños de píxel de 30 y 3 arc segundos respectivamente en la variable BIO12 para coberturas de la línea base.....	82
Figura N° 23: Cambios en la variable BIO6 entre resoluciones de píxel de 30 y 3 arc segundos respectivamente para la línea base y los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 al 2050 según el ensamble de modelos GCM CSIRO_Mk_3_6 y HaDGEM_2.....	86
Figura N° 24: Cambios en la variable BIO9 entre resoluciones de píxel de 30 y 3 arc segundos respectivamente para la línea base y los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 al 2050 según el ensamble de modelos GCM CSIRO_Mk_3_6 y HaDGEM_2.....	88
Figura N° 25: Cambios en la variable BIO11 entre resoluciones de píxel de 30 y 3 arc segundos respectivamente para la línea base y los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 al 2050 según el ensamble de modelos GCM CSIRO_Mk_3_6 y HaDGEM_2.....	90
Figura N° 26: Cambios en la variable BIO12 entre resoluciones de píxel de 30 y 3 arc segundos respectivamente para la línea base y los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 al 2050 según el ensamble de modelos GCM CSIRO_Mk_3_6 y HaDGEM_2.....	91
Figura N° 27: Cambios en la variable BIO13 entre resoluciones de píxel de 30 y 3 arc segundos respectivamente para la línea base y los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 al 2050 según el ensamble de modelos GCM CSIRO_Mk_3_6 y HaDGEM_2.....	93
Figura N° 28: Cambios en la variable BIO16 entre resoluciones de píxel de 30 y 3 arc segundos respectivamente para la línea base y los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 al 2050 según el ensamble de modelos GCM CSIRO_Mk_3_6 y HaDGEM_2.....	94
Figura N° 29: Cambios en la variable BIO18 entre resoluciones de píxel de 30 y 3 arc segundos respectivamente para la línea base y los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 al 2050 según el ensamble de modelos GCM CSIRO_Mk_3_6 y HaDGEM_2.....	96
Figura N° 30: Detalle de una variable de temperatura (BIO6).....	97
Figura N° 31: Detalle de una variable de precipitación (BIO12).....	98
Figura N° 32: comparación espacial para la Pampa del Tamarugal entre la extensión original del piso y la extensión propuesta.....	103

Figura N° 33: Variación de superficie en kilómetros cuadrados de los pisos correspondientes al Bosque espinoso	104
Figura N° 34: Cambios proyectados en los pisos pertenecientes a la formación del Bosque espinoso en los escenarios RCP 4.5 y 8.5 generados a partir del ensamble de los GCM CSIRO_Mk_3_6 y HaDGEM_2 para el año 2050	106
Figura N° 35: Variación de superficie en kilómetros cuadrados de los pisos correspondientes al Desierto absoluto	107
Figura N° 36: Cambios proyectados en los pisos pertenecientes a la formación del Desierto absoluto en los escenarios RCP 4.5 y 8.5 generados a partir del ensamble de los GCM CSIRO_Mk_3_6 y HaDGEM_2 para el año 2050	108
Figura N° 37: Variación de superficie en kilómetros cuadrados de los pisos correspondientes al Matorral bajo de altitud.....	110
Figura N° 38: Cambios proyectados en los pisos pertenecientes a la formación del Matorral bajo de altitud en los escenarios RCP 4.5 y 8.5 generados a partir del ensamble de los GCM CSIRO_Mk_3_6 y HaDGEM_2 para el año 2050	111
Figura N° 39: Variación de superficie en kilómetros cuadrados de los pisos correspondientes al Matorral bajo desértico.....	112
Figura N° 40: Cambios proyectados en los pisos pertenecientes a la formación del Matorral bajo desértico en los escenarios RCP 4.5 y 8.5 generados a partir del ensamble de los GCM CSIRO_Mk_3_6 y HaDGEM_2 para el año 2050	113
Figura N° 41: Variación de superficie en kilómetros cuadrados de los pisos correspondientes al Matorral desértico	114
Figura N° 42: Cambios proyectados en los pisos pertenecientes a la formación del Matorral desértico en los escenarios RCP 4.5 y 8.5 generados a partir del ensamble de los GCM CSIRO_Mk_3_6 y HaDGEM_2 para el año 2050	115
Figura N° 43: Variación proporcional de la especie D. curvula para los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5	117
Figura N° 44: Variación de la especie D. curvula según los escenarios RCP 4.5 y 8.5 al año 2050 en el área de estudio.....	118

Índice de Tablas

Tabla N° 1: Principales hitos asociados a la institucionalidad Chilena respecto a materias de medio ambiente	27
Tabla N° 2: Ejemplos de software de modelación según grupo de modelos	35
Tabla N° 3: Cuadro de 19 Variables bioclimáticas	49
Tabla N° 4 y Tabla N° 5: Valores de correlación de Pearson para las variables bioclimáticas seleccionadas	55
Tabla N° 6: Análisis factorial entre las variables bioclimáticas y su variación en la matriz de datos.....	56
Tabla N° 7: Constantes de regresión de las variables bioclimáticas de la línea base.....	60
Tabla N° 8: Constantes de regresión de las variables bioclimáticas del escenario RCP 4.5	61
Tabla N° 9: Constantes de regresión de las variables bioclimáticas del escenario RCP 8.5	62
Tabla N° 10: Tabla de configuración de MAXENT para la realización de los modelos de formaciones y especies	72
Tabla N° 11: Pisos vegetacionales presentes en el área de estudio	74
Tabla N° 12: Cantidad de registros de especies utilizados para modelar pisos vegetales.. ..	76
Tabla N° 13: Fuente de datos y cantidad de registros de especies para la modelación de D. curvula.....	76
Tabla N° 14: AUC de los modelos de ecosistemas	79
Tabla N° 15: Aportes de las variables independientes a las nuevas variables bioclimáticas post proceso de downscaling.....	83
Tabla N° 16: Variación porcentual respecto de la línea base y los escenarios RCP 4.5 y 8.5 para las variables bioclimáticas de temperatura y precipitación.	99
Tabla N° 17: Tabla comparativa de extensión de las formaciones vegetales entre la modelación mediante regresiones y la propuesta de LUEBERT & PLISCOFF (2006) ...	102

1. Introducción

El reconocimiento del Cambio climático ha sido uno de los tópicos gubernamentales centrales durante las últimas tres décadas en todo el mundo, el cual ha concentrado un sinnúmero de instancias que han dejado en claro su innegable efecto sobre los sistemas globales, como los ciclos de circulación y de nutrientes, que impactan directamente la estabilidad y calidad de vida del ser humano y a la biodiversidad de todas las especies terrestres, con efectos que podrían perdurar, sin importar las medidas que se tomen para reducirlos (MEA, 2005; IPCC; 2013; 2014).

LAZO *et al.* (2008) definen a la biodiversidad como la “*variedad y variabilidad de todos organismos y su hábitat, así como a las relaciones que se originan entre ellos*”, donde los impactos sobre esta se interconectan en todas sus formas, tanto a nivel de genes, como de especies y ecosistemas. De estos, los ecosistemas son los más afectados, porque son directamente dependientes de las condiciones climáticas circundantes (WOODWARD, 1987; WALTER, 2002); un cambio en el clima los afectaría, pudiendo degradar y alterar sus patrones de biodiversidad, fragmentando también su estabilidad y sostenibilidad en el tiempo.

A nivel nacional, el país se encuentra susceptible a recibir los efectos del cambio climático, localizándose dentro del escalafón con un alto grado de susceptibilidad (CONAMA, 2008a). Por ende, se espera que los impactos sobre los ecosistemas localizados en el territorio nacional inevitablemente ocurran.

Bajo esta lógica, se esgrime el objetivo de esta memoria de título, que busca analizar la variabilidad climática del Norte del país para el año 2050, según complejos modelos matemáticos propuestos por el quinto informe del *Panel Intergubernamental de Expertos del Cambio Climático* (AR5 del IPCC). Ellos, servirán de insumos para plasmar una perspectiva de cómo podrían configurarse los ecosistemas terrestres del norte de Chile (CONAMA, 2008b). Además, de alguna especie importante para desarrollo y existencia de las comunidades locales que habitan el Altiplano, la gramínea *Deyeuxia curvula* que es pilar en la dieta alimentaría del ganado camélido andino.

1.1 Planteamiento del problema

Durante las últimas dos décadas, se han expresado intenciones por mejorar la conservación de los ecosistemas globales, tras la aceptación de una generalizada y acelerada degradación de la biodiversidad, producto del aumento de las actividades antrópicas (CBD, 1992; GANN & LAMB, 2006; UICN, 2014). En este marco, la *Millenium Ecosystem Assessment* (2005) (MEA) a través de objetivos propuestos por la ONU y el Banco Mundial, evidenció los impactos de las actividades antrópicas que perturbaban la composición y distribución de los ecosistemas como un factor en rápido crecimiento, y acentuó un especial interés en garantizar la sostenibilidad del medio ambiente para las generaciones futuras. Dentro de las actividades antrópicas, se reconoce al fenómeno mundial del Cambio Climático como un proceso que debe ser abordado de manera urgente y decisiva (ONU, 2015).

Este fenómeno actúa al generar desbalances, que sobrepasan la tasa de auto-regulación global (IPCC, 2013), desencadenando aceleradas variaciones climáticas a multi-escala, propiciando la ocurrencia de eventos extremos a periodos temporales menores (IPCC, 2013), aumentando los eventos atmosféricos cálidos por sobre los fríos (CONAMA, 2006: 17). Estos impactos han provocado procesos de calentamiento sin precedentes, donde se configura el ser humano, como una influencia innegable desde la revolución industrial (IPCC, 2014); propiciando la desertificación en muchas las regiones del mundo -menos la Antártica-, y afectando a casi 2 billones de habitantes en el año 2000 (MEA, 2005; KEFI *et al.*, 2007; IPCC, 2014).

Por otra parte, del concepto de ecosistema se desglosa la interacción compleja entre las poblaciones de organismos y su medio (TANSLEY, 1935; CBD, 1992). Estos quedan representados de buena manera por las comunidades vegetales, al reunir buena parte de sus funciones esenciales permitiendo la entrada de energía, además de concentrar la mayor cantidad de biomasa y productividad de los ecosistemas per se (LEUSCHNER, 2005). A su vez, la distribución espacial de la vegetación viene estrictamente condicionada a la variación climática sobre el entorno (WOODWARD, 1987; WALTER, 2002). Bajo este enfoque, resulta imprescindible conocer sobre los escenarios más actualizados de Cambio Climático futuros, argumentando la comprensión de la vegetación en un eje lógico a los cambios proyectados.

A escala nacional, Chile se ha catalogado como un país “*altamente vulnerable a los efectos del cambio climático*” (CONAF, s/a), al presentar 7 de los 9 indicadores de vulnerabilidad climática propuestos en el artículo N° 4.8 de la convención en el “*Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*” (CONAMA, 2008a: 13). Pese a esto, Chile no es un emisor importante de *Gases de efecto Invernadero*, alcanzando valores cercanos al 0,2% de las emisiones mundiales (CONAMA, 2008a: 16), sin embargo, se manifiestan aumentos

sin precedentes en las emisiones nacionales de GEI en los años recientes (CN1, 1999 en CONAMA 2008a), que podrían inclinar este tipo de tendencia.

El norte del país se configura como un entorno complejo que integra ecosistemas diversos, reflejados en el desierto de Atacama, a parte del Altiplano Andino, y a una franja costera de poco más de 900km de largo que gracias a la presencia de la corriente de Humboldt identifica condiciones excepcionales para el desarrollo de la vida marina. No obstante, este territorio desarrolla una de las menores áreas de protección ecosistémica nacional, específicamente: los ecosistemas desérticos en altura (PLISCOFF & FUENTES, 2008), que sólo presentan limitadas estructuras pertenecientes a los principales salares allí localizados.

La existencia de nuevas metodologías pone al alcance el desarrollo de los *Modelos de Circulación Global* (GCM) y los modelos de distribución de especies. Los GCM son representaciones físicas de los sistemas (atmósfera, océanos) y subsistemas globales (principalmente ciclos biogeoquímicos) que operan bajo parámetros basados en leyes físicas comprobadas. Se encuentran representados mediante imágenes que enlazan la información de miles de estaciones de monitoreo climático. Generando información cuantitativa validada ampliamente por la comunidad científica (LEEMANS & CRAMER 1991; NEW *et al.*, 2001; HIJMANS *et al.*, 2005; ZIMMERMANN, 2010; FLINT & FLINT 2012), esgrimiéndose como una herramienta robusta, que ha pasado a estructurar la espina vertebral de los estudios hidrológicos y ecológicos de la últimas dos épocas (ZIMMERMANN, 2007; FLINT & FLINT, 2012).

Sin embargo, la utilización de los GCM supone limitaciones, su tamaño de píxel dificulta la representación a contextos regionales y locales (WILBY & DAWSON, 2002). Estas dificultades son magnificadas en zonas geográficamente accidentadas, y/o con amplias variaciones térmicas y en zonas con escasa cobertura de estaciones de monitoreo, como los andes de Sudamérica (HIJMANS *et al.*, 2005); no obstante, recientemente se ha avanzado en la generación de líneas base y proyecciones climáticas futuras para Chile, a mayor grado de confiabilidad que las propuestas a escala global (PLISCOFF *et al.*, 2014).

A su vez el desarrollo de los modelos de distribución de especies se estructura para identificar la distribución de comunidades bióticas respecto de sus patrones espacio-temporales con representaciones parciales de la realidad, periodos definidos y limitaciones claras (CHEFAOUI, 2011; PLISCOFF & FUENTES, 2011; MATEO *et al.*, 2011); las limitaciones son originadas por las imposibilidades tecnológicas de los datos y softwares disponibles a la fecha, que se traducen en la incapacidad de interpretar más precisamente la actualidad y proyectar el futuro a través de modelos computacionales. Sin embargo, la utilización de Modelos de distribución de especies ha entregado resultados robustos en una amplia gama de investigaciones, operando tanto en escenarios presentes como futuros (PHILLIPS, 2004; PHILLIPS *et al.*, 2006; WIENS *et al.*, 2009; BARROWS *et al.*, 2010;

SINCLAIR *et al.*, 2010; CHEFAOUI, 2011; PLISCOFF & FUENTES, 2011; HOWARD *et al.*, 2014).

Bajo esta representación, se apremia el objetivo de analizar el comportamiento de los ecosistemas terrestres (pisos de vegetación) vigentes actualmente para Chile (CONAMA, 2008b) proyectados al año 2050 (escenario próximo pero no inminente) bajo los escenarios RCP 4.5 y 8.5 del quinto informe del IPCC, mediante el ensamble de los GCM HadGEM_2 y CSIRO_Mk3_6 en la región de Tarapacá (al ser una región de alta incertidumbre climática) que han sido modificados según la metodología de *anomalías* (BUYTAERT *et al.*, 2008), recientemente aplicada en PLISCOFF *et al.*, (2014), quienes incorporan una nueva línea base, entregando resultados más precisos para el sur de Sudamérica. Además, se resuelve la aplicación de un downscaling estadístico mediante regresiones lineales múltiples para proyectar el modelo a una resolución final de muy, muy alta resolución (3 arc segundos, equivalente a 0,086km y comúnmente interpretado como 100 metros), permitiendo la modelación de los pisos de vegetación que se localizan a la misma resolución de píxel, entregando una visión perspectiva de lo que podría ocurrir para el futuro climático de la región de Tarapacá. Y ayudando a responder la siguiente premisa: ¿Cómo se ven afectados los ecosistemas terrestres en el norte de Chile respecto de las proyecciones de cambio climático?

Y más aún, ¿cómo podrían impactar los cambios ecosistémicos a las comunidades locales respecto del cambio climático? Para esto se efectúa la modelación y proyección al año 2050 (siguiendo la misma configuración de escenarios RCP) de una especie vegetal de importancia estratégica para las comunidades rurales que sobreviven en el altiplano Chileno del área de estudio. La especie corresponde al pajonal azonal de *Deyeuxia curvula* (gramínea) presenta un alto valor ganadero (SAG, 2009;), estando presente de manera importante en la dieta de la población de camélidos desde tiempos pre-hispánicos, y asociada fuertemente al desarrollo de la cultura aymara en la zona (CASTELLARO *et al.*, 2004; CEH, 2011).

1.2 Objetivos e hipótesis

Para la presente memoria, se propone la realización de un objetivo principal y tres objetivos específicos. Estos objetivos buscan el análisis de patrones biogeográficos respecto de escenarios futuros de cambio climático propuestos según el quinto informe del Panel Intergubernamental de Expertos del Cambio Climático.

1.2.1 Objetivo general

Analizar la variabilidad climática para el año 2050 de la región de Tarapacá mediante Modelos de Circulación Globales de muy, muy alta resolución para evaluar la distribución de pisos vegetacionales y especies.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Analizar las diferencias para los modelos ensamblados HaDGEM_2 y CSIRO_Mk_3_6 tras la realización de un Downscaling estadístico desde 30 a 3 arc segundos en escenarios RCP 4.5 y 8.5 al año 2050 en el área de estudio.
2. Contrastar y analizar las diferencias entre la modelación y la proyección futura de pisos vegetacionales mediante los modelos climáticos ensamblados HadGEM_2 y CSIRO_Mk_3_6 al año 2050 en los escenarios RCP 4.5 y 8.5 a 3 arc segundos.
3. Contrastar los cambios entre la modelación y la proyección futura de la especie *Deyeuxia curvula*, específicamente en las cuencas Altiplánicas del área de estudio mediante los modelos climáticos ensamblados HadGEM_2 y CSIRO_Mk_3_6 al año 2050 en escenarios RCP 4.5 y 8.5 a 30 arc segundos.

1.2.3 Hipótesis propuesta

Los escenarios de cambio climático para el año 2050 proyectarán una disminución en la extensión de la vegetación semi-desértica en contraste con el aumento extensivo de la vegetación desértica y el desierto tropical costero e interior. Este contraste será más notorio en el escenario RCP 8.5, y su visibilidad será mayor en las zonas medias altas de la región, específicamente en el área de transición hacia el altiplano andino chileno y la zona próxima a los salares andinos como los Salares del Huasco, Coposa y Lagunillas.

2. Área de estudio

El área de estudio comprende la extensión total de la región de Tarapacá, que se caracteriza por presentar diversos entornos físicos que se diferencian notoriamente unos de otros presentando espacios tanto a nivel del mar como a alturas superiores a los 4000 msnm, que junto a las regiones de Arica y Parinacota y Antofagasta, se ordenan como las únicas con presencia nacional en el altiplano andino Sudamericano, así como numerosas quebradas endorreicas que cizallan profundas gargantas en el territorio, diferenciando diversos ecosistemas que se diferencian abruptamente unos de otros.

“Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de Cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y Modelos de Circulación Global de muy, muy alta resolución”.

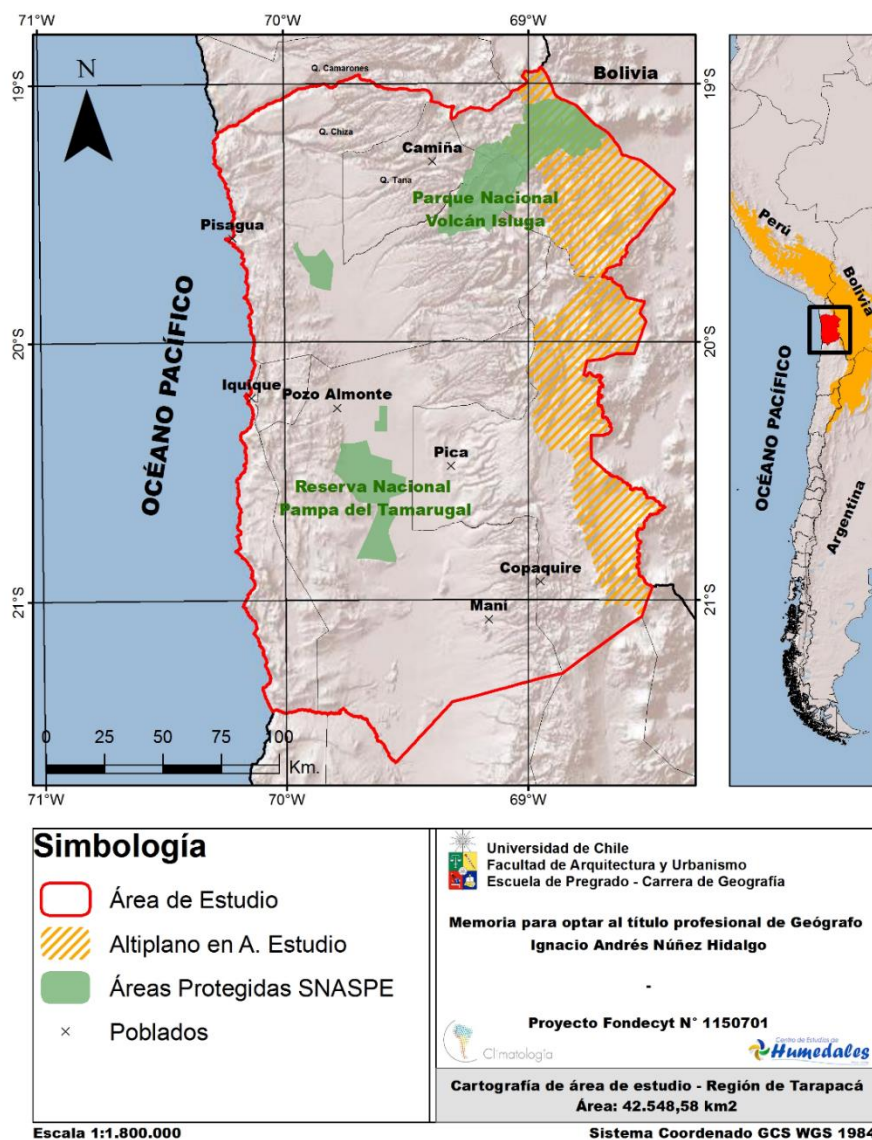


Figura N° 1: Presentación general del área de estudio. Fuente: Elaboración propia. Los límites del Altiplano Sudamericano corresponden a los presentados por FUND (2014).

Obtenidos de: <http://www.eoearth.org/view/article/151003>;
<http://www.eoearth.org/view/article/151005>;
<http://www.eoearth.org/view/article/51cbcd327896bb431f690739>

A continuación, se presentará una descripción de los principales entornos, elementos y características de la región, que presenten atinencia con la presente memoria de título.

2.1 Geología y Geomorfología

El área de estudio se presenta con diversas estructuras geológicas, SEYFRIED *et al.* (1999) identifica una poderosa prevalencia de la cadenas montañosas de los andes sobre la configuración y estructura del relieve, las actividades humanas y la biota.

Los autores aseveran que durante los últimos 200 millones de años, las placas tectónicas de Nazca y Sudamericana han estado bajo procesos de subducción entre ellas, pero que sólo hace 20 millones de años se han dado procesos de volcanismo intenso, que en conjunto con los procesos tectónicos existentes han dado paso a la formación y engrosamiento cortical de la cordillera de los andes en esta zona de Sudamérica.

Esta actividad volcánica ha sido de grandes proporciones, aumentando la superficie y ancho de la cordillera significativamente, a través de un proceso en cadena denominado *apilamiento telescópico*, que es definido como el “*recalentamiento y ablandamiento de la corteza continental inferior*” que luego es obligada a expulsarse hacia la superficie producto de la fuerza ejercida por el escudo brasileño que la compacta hacia el oeste. Este proceso además genera una gran cantidad de magma, que es expulsado por los grandes volcanes de la zona dando paso a la formación de vastas ampliaciones corticales.

Respecto de la geomorfología del área de estudio, GALLARDO (2015) recientemente describió el estado del arte, que preserva parte de las descripciones otorgadas por SEYFRIED *et al.* (1999). Sus observaciones destacan cinco unidades geomorfológicas estructurales, siendo estas (en sentido oeste-este):

- a) Cordillera de la Costa: Al oeste se limita por los acantilados costeros, que colindan con el océano pacífico. La extensión total de los acantilados costeros es de aproximadamente 800km y 700msnm de altura como promedio. La extensión de la cordillera de la costa nace en el morro de Arica.
- b) Depresión Central: Zona deprimida comúnmente denominada como depresión intermedia. Su capa más superficial data del neógeno (material de relleno) y presenta vital importancia ya que contiene a la Pampa del Tamarugal y gran parte el desierto de atacama. Esta depresión se encuentra incidida por numerosas quebradas al norte de la latitud 19°30'S, que incluso atraviesan la

cordillera de la costa. Las quebradas corresponden a las de Camarones, Chiza y Tana.

c) Precordillera: Se constituye por numerosas quebradas, su incidencia se encuentra mayormente marcada entre los 19°30'S y los 21°30'S, zonas donde las quebradas desaparecen en la depresión central, dando paso a importantes conos sedimentarios. Desde los 20°S al sur la Precordillera pasa a conformar la cordillera de Domeyko.

d) Cordillera Occidental y Oriental: Zona de desarrollo del actual arco volcánico, presenta grandes volcanes que sobrepasan los 6000 msnm, su antigüedad data del Jurásico hace 20 millones de años (SEYFRIED *et al.*, 1999; PINTO *et al.*, 2004)

e) Altiplano: Corresponde a una gran cuenca endorreica limitada por la Cordillera (Occidental y Oriental). Se presenta en un *plateau* producido por el ensanchamiento cortical dado por la actividad tectónica y el volcanismo intenso durante los últimos 20 millones de años. Sus altitudes medias oscilan entre 3500 y 4500 msnm, y presenta una extensión a lo largo de Chile, Argentina, Perú y Bolivia.

“Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de Cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y Modelos de Circulación Global de muy, muy alta resolución”.

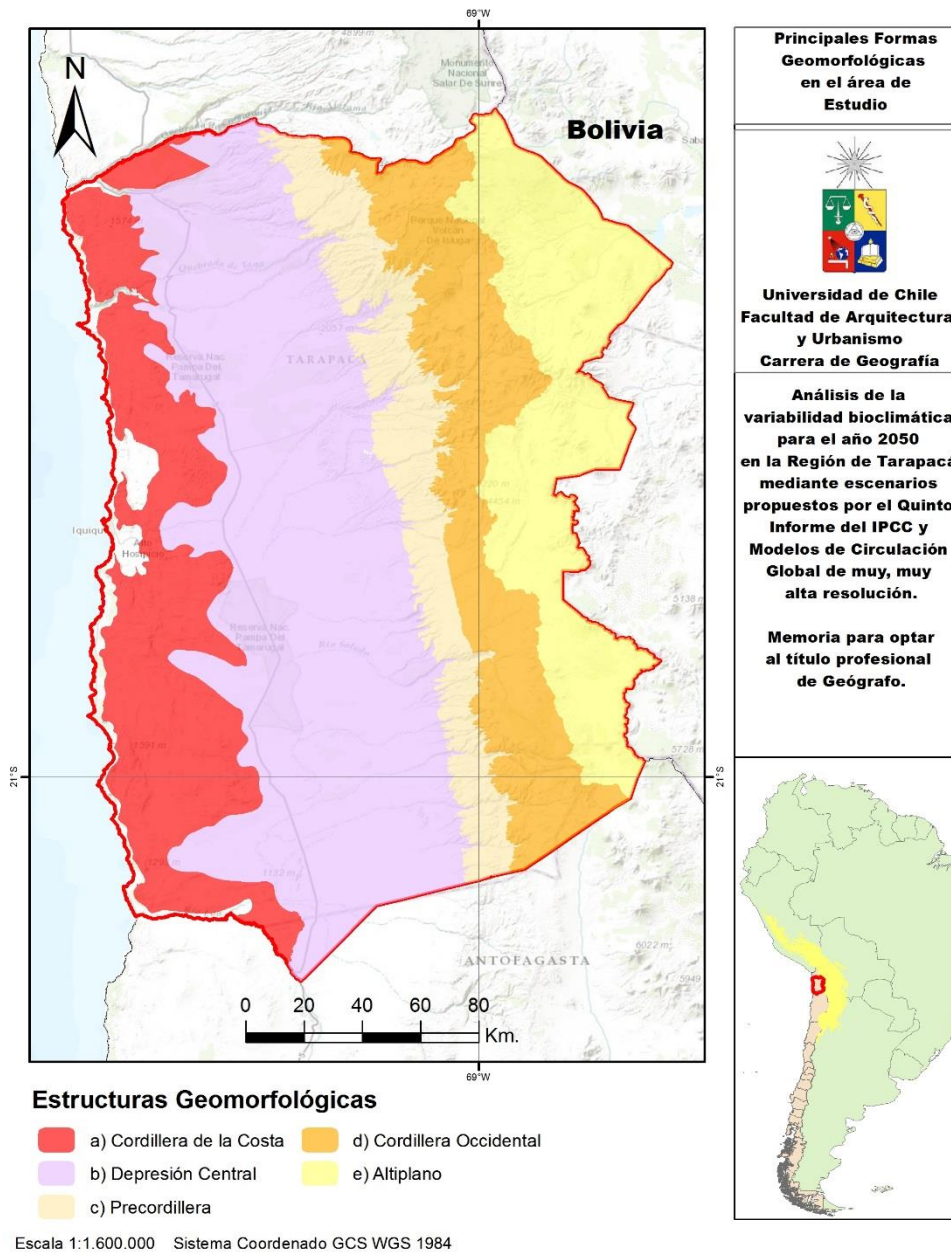


Figura N° 2: Principales estructuras geomorfológicas presentes en el área de estudio.
Fuente: Elaboración propia a partir de SEYFRIED *et al.*, (1999), PINTO *et al.*, (2004) y GALLARDO (2015).

2.2 Hidrología

En el área de estudio se encuentran presentes sistemas de salares que suman un total de 5 cuencas altiplánicas¹ conformando importantes espejos de agua en la región. La mayoría de los salares se localizan en la extensión denominada “Franja de los Salares” (GRILL *et al.*, 1999 en ZAMORA, 2013), que oscilan entre los 3400 y los 4500 msnm, sustentando ecosistemas que albergan numerosas especies de aves, vegetación azonal y algunas especies endémicas. Ciertos autores como GRILLI *et al.* (1999) han aseverado que algunas quebradas endorreicas localizadas aguas abajo se encontrarían alimentadas por estos salares a través de conexiones subterráneas propiciadas por fallas geológicas en el sector, lo que aumentaría la importancia de estos en el balance hídrico de la región.

Los ríos y quebradas presentes en el área de estudio son en su mayoría del tipo endorreica, y se encontrarían infiltrando aguas abajo, en los fondos de quebrada de la Depresión Central y el Altiplano.

A nivel de acuíferos la gran mayoría se extiende dentro del área de estudio, entre el Altiplano y la Depresión Central. Los más relevantes pertenecen a la Pampa del Tamarugal, y reciben sus recargas desde las partes altas de las cuencas de la Precordillera y parte del Altiplano a alturas estimadas de 3000 a 3500 msnm (DGA, 2012). Estos acuíferos son el sustento de importantes vegas y bofedales de la zona, y se encuentran localizados en el Altiplano, la Precordillera y un fragmento de la Depresión Central. De estos acuíferos una proporción menor se encuentra protegida, debido a que alimentan las vegas y bofedales críticos del Altiplano

2.3 Biogeografía y Climatología

La condición de dominio orográfico de la cordillera de los Andes resulta determinante en la configuración climática y vegetacional de Chile, al propiciar la formación de importantes sombras de lluvia y endemismos por aislamiento geográfico. VILLAGRAN & HINOJOSA (2005) manifiestan que los Andes ejercen una formidable barrera atmosférica que divide la vegetación desde la imponente selva amazónica al desierto más árido del mundo.

Además, sostienen que la condición hiper-árida del norte de Chile no sólo viene determinada por la cordillera, sino que es el producto de su combinación con el dominio del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur (APSO) que confluye aguas frías provenientes de la Corriente de Humboldt y zonas de surgencia de aguas profundas localizadas en el frente Peruano. Este dominio climático se extiende aproximadamente hasta los 30° S, punto

¹ Información vectorial de cuencas hidrográficas de la DGA

desde el cual comienza a dominar el cinturón de vientos del oeste (CVO) sobre el mismo APSO, confiriendo condiciones más húmedas a la zona central y sur de Chile.

Esta condición de hiper-aridez se extiende en una franja N-S longitudinal en sentido NO-SE denominada “*Diagonal Árida*”, que disyunta a las comunidades vegetales de Sudamérica y extiende el dominio desértico como una barrera biogeográfica innegable (VILLAGRÁN & HINOJOSA, 2005).

Levemente aislado de esta condición hiper-árida se encuentra el Altiplano, que gracias a su localización a grandes altitudes presenta algunas condiciones de humedad asociadas a lluvias estivales provenientes del Amazonas, que le permiten la presencia a una reducida cantidad de especies vegetales que se concentran a medida que la gradiente de aridez es reducida por las precipitaciones.

Según la clasificación de ACEITUNO (1996) el dominio climático del altiplano se extiende hasta los 21°S aproximadamente, sin embargo MINVIELLE & GARREAUD (2011) extienden su dominio climático hasta los 22°S. El altiplano se caracteriza por presentar un dominio de bajas densidades del aire y presiones atmosféricas asociadas al escaso grosor atmosférico existente en dichas altitudes, que evidencian una amplia variación térmica asociada a la gran cantidad de radiación solar incidente durante el día y la consecuente baja capacidad de retención durante la noche (ACEITUNO, 1996). También explica que las precipitaciones orogénicas son producidas por la advección de vapor de agua proveniente del Amazonas que es forzado a precipitar en tormentas convectivas durante las tardes, generando importantes centros de confluencia de sombra de lluvia.

3. Marco teórico

A continuación se presenta la exposición de cierta información recopilada y de los conceptos teóricos que se abarcan en la presente memoria de título. Las áreas del conocimiento enlazan temas de disciplinas como la ecología, la biogeografía la climatología y el cambio climático.

3.1 Estado del arte en la conservación de la biodiversidad

La diversidad biológica se entiende como la variabilidad y las relaciones expresadas en organismos vivos y ecosistemas y sus complejos ecológicos. En cambio los ecosistemas son definidos como *“un complejo dinámico de comunidades vegetales, animales y de microorganismos y su medio no viviente que interactúan como una unidad funcional”* (CBD, 1992), actuando como el puente que comunica a los organismos con su medio (TANSLEY, 1935).

La biodiversidad es un término que en sus inicios fue catalogado a una ambigüedad del término “diversidad biológica”, cuando en 1985 WILSON lo establece (en CONAMA, 2008b) así. Este término luego se adaptaría y pasaría a conformar su actual definición.

Actualmente el concepto de biodiversidad ha sido re-enfocado a una visión multi-enfoque. LAZO *et al.* (2008) a través del informe de Biodiversidad de la CONAMA (2008b) sostienen que este término se refiere a la *“variedad y variabilidad de todos organismos y su hábitat, así como a las relaciones que se originan entre ellos”*. Además sostiene que la biodiversidad se estructura en tres niveles: genes, especies y ecosistemas, las que se encuentran interconectadas.

Por ejemplo, la diversidad de especies tiene que ver con la riqueza y el número de especies en una unidad espacial determinada, -se ha planteado que las zonas que presentan mayores indicadores de riqueza son aquellos que mejor eficiencia ecosistémica tienen.

En tanto, la diversidad de ecosistemas se presenta como una red de diversos ecosistemas que están en una continua dependencia, de modo que sí se afecta negativamente uno de estos, el impacto será compartido con los otros ecosistemas que lo rodean, propiciando un efecto degenerativo en cadena (TILMAN, 2000 ;CONAMA, 2008b).

Perspectivas como las de SIMONETTI *et al.* (2005) y ALANIZ (2014) manifiestan que los ecosistemas soportan fuertes carga antrópicas, debido al innegable impacto del ser humano durante los últimos 50 años, especialmente por el cambio y manejo en el uso de suelos, que ha provocado condiciones de desertificación y degradación a escala mundial (KEFI *et al.*, 2007). De hecho TILMAN (2000) ya había manifestado que las medidas de los programas de conservación de los países deberían estar entrelazadas a multi-escala y no a nivel de especie individual, a fin de evitar el quiebre conjunto de todos los sistemas, que se encuentran soportando el estilo y forma de vida humana, y que son responsables de la manutención de los ciclos biogeoquímicos, del estado aeróbico de la atmosfera y de la regulación de los Gases de Efecto Invernadero global, entre muchos otros.

Para NOSS (1996) los ecosistemas serían la piedra angular para lograr la conservación de la biodiversidad, A su vez, LEUSCHNER (2005) plantea que las comunidades vegetales

son los mejores y mayores representantes ecosistémicos existentes al reunir buena parte de sus funciones esenciales y al permitir el flujo de energía de manera constante, concentrando altas cantidades de biomasa y productividad en un espacio geográfico.

3.1.1 Formas de conservación de la biodiversidad en el mundo

La conservación de la biodiversidad ha sido un tópico mundial, que se ha intentado canalizar a través de variados organismos internacionales. Estos esfuerzos han sido más activos desde la segunda mitad del siglo XX a través de entidades no gubernamentales como la UICN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza), la TNC (The Nature Conservancy), la WWF (World Wildlife Found) y la ONU (Organización de las Naciones Unidas), entre otras. Bajo este enfoque, se tratan de normar los esfuerzos individuales en torno a un bien mancomunado bajo normativas y pactos de compromiso. A continuación se presentan las entidades no gubernamentales e iniciativas mundiales en pro de la conservación biológica mediante un orden cronológico.

En el año 1948 bajo el marco de la conferencia de Fontainebleau (Francia) se dio la fundación de la UICN, que fue el primer organismo internacional directamente vinculado a propiciar la conservación de la biodiversidad en el mundo, dando paso a la generación de acciones como la creación de los sistemas de áreas protegidas y las listas rojas de ecosistemas y especies en diversas áreas del mundo (UICN, 2013).

La segunda gran organización que surgió es TNC. Si bien fue inicialmente fundada en el año 1915 bajo el nombre de *“The Ecological Society of America”*, recién en el año 1950 fue renombrada con su nombre y visión actual (TNC, 2015). Esta organización sin fines de lucro busca promover iniciativas de conservación en todo el mundo, bajo la intención de incluir a las comunidades locales dentro del pensamiento de ecosistema. En Chile, la ONG logró un hito al establecer en el año 2005 un *Área Protegida de Propiedad Privada (APP)* conocida como la Reserva Costera Valdiviana. Esta zona busca promover la conservación del bosque lluvioso valdiviano, que ha sido reconocido como uno de los ecosistemas con mayor valor ecológico del mundo.

Otro gran organismo internacional corresponde a la WWF y fue fundada en el año 1961. Sus objetivos van más allá de promover la conservación de la biodiversidad biológica, porque guardan relación con *“frenar el cambio climático, reducir los tóxicos en el ambiente, proteger nuestros océanos y ecosistemas de agua dulce, detener la deforestación y salvar especies”*. En Chile sus acciones buscan promover la conservación de la ecorregión valdiviana y los sitios marinos prioritarios del extremo Austral del país (WWF, 2015).

El aporte de la ONU se manifestó en el año 1973 mediante su programa “Naciones Unidas para el Medio Ambiente”, el programa promueve los objetivos centrales de la ONU, pero enfocado en materia medioambiental. Dentro de estos objetivos se manifiesta el interés por coordinar, analizar, advertir, evaluar, promover e impulsar medidas que favorezcan al derecho ambiental internacional a favor el medio ambiente y las comunidades humanas (DANIDA, 1996).

Por otra parte, se cuenta con la conformación de algunos convenios ambientales internacionales, dentro de los cuales los más relevantes son la convención RAMSAR y el CBD. La convención RAMSAR fue unificada desde la UNESCO con la misión de combatir el deterioro ecológico de los humedales producto de las actividades antrópicas, reconociendo a los humedales como componentes esenciales en la regulación del ciclo hidrológico y el sustento de la vida, fue formado el año 1971 en Irán y establece en su artículo primero que *“son humedales las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean estas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros”* (RAMSAR, 1994). En Chile la convención RAMSAR ha logrado declarar 13 sitios, de los cuales 5 se localizan en la zona norte del país, siendo 4 los pertenecientes a salares Altoandinos.

La fundación del CBD (Convenio sobre la Diversidad Biológica) ocurre en el año 1992. Fue formado en el marco de la cumbre de la Tierra de Río de Janeiro (Brasil). Su visión guarda relación con la propuesta de TNC al querer incluir la utilización sostenible, justa y equitativa de los recursos biológicos dentro del plan mismo. El convenio fue adscrito por 150 países y se encuentra regido por el COP (Conferencia de las Partes) que manifiesta siete programas mundiales asociados a siete biomas terrestres. Chile es uno de los países que se adscriben en el CDB y busca promover los lineamientos mediante la Estrategia Nacional de Biodiversidad y los Planes de Acción.

3.1.2 Estructura y formas de conservación en Chile

Chile presenta una estructura de protección y conservación de la biodiversidad que se engloba dentro del marco ciertas entidades no gubernamentales como lo son la UICN y el CBD. Sin embargo, su estado actual se debe a una sucesión de hechos que han ocurrido históricamente, confiriéndole características y atribuciones propias. En ese aspecto, ALANIZ (2014) realiza una reconstrucción histórica que permite reconocer los grandes pilares en la conformación de la estructura e institucionalidad actual, referente a temas de conservación y protección del medio ambiente en el país.

Hito	Año	Ley	Detalle
Ley de Bosques Fiscales	1879	DS S/N	Protegió de su explotación y loteo una franja de 10km y 1km para la cordillera andina y de la costa de los terrenos fiscales de Angol, Arauco, Valdivia y Llanquihue, su promulgación sentó las bases para la creación de la primera reserva forestal de Chile.
Creación sistema de Reservas y Parques Nacionales	1907	DS n°1.540	Se crea la Reserva Nacional Malleco
Se crea la Inspección general de bosques, caza y pesca	1912		Proponía el estudio de las especies contenidas en el territorio nacional con el fin de buscar un beneficio económico de estas, y de controlar la caza ilegal de especies.
Convención para la protección de la flora y fauna y las bellezas escénicas de América	1940	N/A	Obliga a respetar los límites de los Parques Nacionales, estos no podrán ser alterados ni afectados bajo ninguna forma.
Nace el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG)	1967	n° 16.640	Originalmente buscaba administrar los bosques y áreas protegidas del estado
Nace la Corporación Nacional Forestal (CONAF)	1970	Creada bajo escritura pública notarial.	Reemplaza a la Corporación de Reforestación, y se encarga de Aplicar el D.L. n°701 sobre fomento forestal, de cuidar las áreas protegidas del estado y aplicar medidas de control a los incendios y plagas forestales. La CONAF funciona como entidad privada, y no puede ejercer facultades no estipuladas por la ley (FERNÁNDEZ, 1999), además de depender del Ministerio de Agricultura hasta la fecha.
Nacen los Predios fiscales protegidos (Bienes nacionales protegidos)	1977		Encargado de dictar la nueva ley de bosques

Hito	Año	Ley	Detalle
Se intenta crear un sistema de áreas silvestres protegidas	1984	n° 18.362	Nunca entró en vigencia, proponía que la CONAF cambiase su nombre a "Corporación Nacional Forestal y de Protección de los Recursos Naturales Renovables", atribuyéndole una entidad pública y descentralizada con propiedad jurídica propia y mayor capacidad de autonomía (FERNÁNDEZ, 1999).
Ley general de bases del medio ambiente	1994	n°19.300	Crea la CONAMA y la COREMA (Comisiones nacionales/regionales de medio ambiente). La CONAMA tenía la labor consultiva en materias medioambientales, propiciando asesoría técnica al presidente de la república en estos temas (ANALIZ, 2014).
Creación del Ministerio del medio ambiente y Superintendencia del Medio Ambiente	2010	n°20.417	Se deroga la CONAMA/COREMA, dando paso a un nuevo organismo para la gestión y protección del medio ambiente en Chile. Se crea el Ministerio del Medio Ambiente conjunto con el SEA y la SMA (Servicio de Evaluación Ambiental/ Superintendencia del Medio Ambiente), que se encargan de otorgar los permisos de ejecución de proyectos que afecten el medio ambiente y de fiscalizar y sancionar según la normativa ambiental vigente (respectivamente)

Tabla N° 1: Principales hitos asociados a la institucionalidad Chilena respecto a materias de medio ambiente. Fuente: Elaboración propia en base a SAG (1993), FERNÁNDEZ (1999), MMA (2011) y ALANIZ (2014).

El *Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado* (SNASPE) se encuentra a cargo de la CONAF y es la estructura de conservación y protección de las áreas protegidas dentro del territorio nacional. Actualmente se estructura en 100 zonas distribuidas en 36

Parques Nacionales, 49 Reservas Nacionales y 15 Monumentos Naturales, que logran abarcar el 19,2% del territorio nacional (CONAF, 2015).

Autores como PELLET *et al.* (2005) y PLISCOFF & FUENTES (2011) han identificado los patrones de distribución de las áreas protegidas del sistema SNASPE-Privada (APP) en comparación con la cobertura de pisos ecológicos, sosteniendo que la estructura de protección tiende a concentrarse en los extremos más australes del país provocando fuertes desequilibrios en las zonas norte y centro del territorio nacional, donde la superficie abarcada es muchísimo menor, y las fuentes de estrés son mucho mayores.

Esto es causado debido a que el SNASPE no se encuentra legalmente respaldado dado que la ley n°18.362 jamás entro en vigencia, implicando que la SNASPE se encuentra dependiendo de la ley de bosques de 1931.

FERNÁNDEZ (1999) y SIMONETTI *et al.* (2005) son enfáticos al señalar que este impedimento ha sido una gran limitación para Chile debido a que no han podido sumar al Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Estado muchos de los convenios internacionales que abordan temáticas de biodiversidad.

El hecho de buscar proteger ciertas zonas de Chile bajo el alero de organizaciones no gubernamentales y áreas protegidas privadas deja en la palestra la imperiosa necesidad de llevar a cabo una actualización normativa a la estructura de conservación del estado, a fin de garantizar la protección con entidades que se encuentren vigentes respecto de las tendencias globales en pos de la conservación biológica, y no respecto de una visión reaccionaria (PELLET *et al.*, 2005).

3.2 Teoría de nichos ecológicos

El concepto de nicho ecológico busca responder a la forma en como las especies se distribuyen dentro del sistema terrestre, especificando áreas que pueden diferir en cada caso y especie (MARTÍNEZ, 2013). Como concepto, el nicho ecológico se ha ido transformando de manera constante, al verse marcado por las dificultades de intentar explicar una pregunta ecológica desde una perspectiva antropocéntrica. Llegando a convertirse en uno de los campos de más popularidad en la ecología durante las últimas décadas (ZIMMERMAN *et al.*, 2010), a través de las nuevas oportunidades derivadas del modelamiento computacional (RUSHTON *et al.*, 2004).

Su construcción actual se ha enriquecido a partir de ciertos consensos teóricos comunes en torno a las teorías neurálgicas presentadas por GRINNELL (1917), ELTON (1933 en SOBERÓN 2007) y HUTCHINSON (1957), que buscaron definir de forma pionera el

comportamiento y la relación de las especies terrestres sobre el espacio geográfico -y viceversa-, logrando aportes progresivos al concepto que se maneja en la actualidad.

Desde la primera mitad del siglo XX GRINELL (1917) definió al nicho como una propiedad intrínseca del *espacio geográfico*, que podía ser ocupada por *una* especie a la vez.

Su concepto se encuentra fuertemente arraigado en la idea de una naturaleza que le concede vacantes de ocupación a las especies que la habitan. De esta forma el nicho de GRINELL se considera como la última unidad distributiva de una especie, que se encuentra contenida en un espacio singular y bajo limitaciones estructurales e instintivas propias (SOBERÓN, 2007)

Posteriormente, aparecen los aportes de ELTON (1933), quien incorporó la noción de las comunidades vegetales. Su teoría establecía que habría impactos en la distribución de una especie si se considerara su relación en conjunto con otras especies; la relación estaba dominada por la red trófica (cadena alimenticia), que era su componente central en la estructura del nicho. Estas especies se encontraban compitiendo por recursos finitos en un espacio común, definiendo al nicho desde el status del animal en su comunidad, contrapuesto al nicho Grinnelliano al desafiar la premonición de una naturaleza dominante sobre las especies.

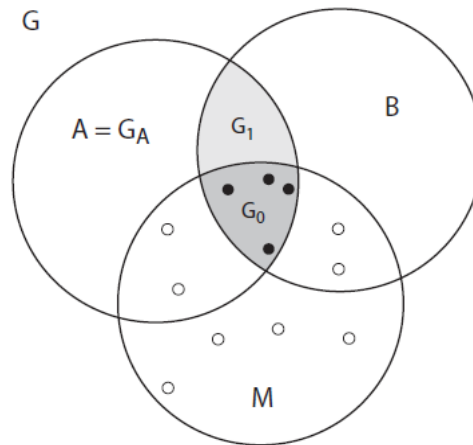
El aporte de HUTCHINSON (1957) considera la condición esencial de requerimientos ambientales de GRINNEL y las relaciones intra-especies de ELTON al proponer un enfoque visto desde la relación entre los componentes que limitan la distribución de las especies en base a sus tolerancias y/o requerimientos. Los componentes pueden ser *factores ambientales* (temperatura, precipitación), *factores bióticos* (relación con otras especies, características intrínsecas de la especie) y *factores abióticos* (humedad relativa, pH, salinidad).

El nicho ecológico de HUTCHINSON es definido como el volumen que ocupa la especie en el espacio que le permite un aumento positivo en su población (HUTCHINSON, 1957), bajo el alero de los componentes dimensionales potencialmente ilimitados. Si se cumple el estado en que intersectan todas las características que limitan la distribución de una especie se llega al *hipervolumen n-dimensional*, o nicho final. Este estado resulta imposible de graficar debido al ilimitado potencial de variables que impide determinar la totalidad de los factores determinantes (HUTCHINSON, 1957; MARTÍNEZ, 2013).

3.2.1 Nicho fundamental y nicho realizado

Dentro del nicho Hutchinsoniano, al darse el caso donde se cumplan las características bióticas y abióticas necesarias para situar la supervivencia de la especie se podrá hablar de una condición de *nicho fundamental*. A su vez, si se cumple la intersección entre el nicho fundamental y la presencia efectiva de esta, se cumplirá el *nicho realizado* (HUTCHINSON, 1957; SOBERÓN, 2007; MARTÍNEZ, 2013)

Las condiciones limitantes que divide al nicho fundamental con el nicho realizado están ligadas a barreras físicas (océanos, cordilleras, desiertos) o biológicas (escases de alimento, competencia con otras especies, capacidad de dispersión limitada) que impiden la colonización de dicha especie en zonas donde se presenten las condiciones ambientales pertinentes.



A= Factores abióticos

G₀= Nicho realizado

B= Factores bióticos

G₁= Zona que puede ocupar la especie, pero que no ocupa

M= Factores de movimiento

Figura N° 3: Nicho fundamental y nicho realizado, el nicho fundamental es la sumatoria entre G₁ y G₀. Fuente: PETERSON *et al.*, 2011

3.2.2 Cuantificación de nichos ecológicos

Los nichos ecológicos son cuantificables y medibles en el espacio debido a que los factores que permiten determinar su localización también lo son (AUSTIN, 2007; MARTÍNEZ, 2013), al presentarse en coberturas raster fácilmente manipulables. La existencia de bases de datos climáticas ha permitido generar capas mundiales que representan el comportamiento de las precipitaciones y las temperaturas a escalas de gran detalle y precisión. Y han sido llevadas periodos temporales del pasado, presente y futuro (HIJMANS *et al.*, 2005).

El estudio de nichos en la biogeografía ha devenido en el desarrollo de los modeladores de especie. Que corresponden a complejos programas computacionales que intersectan los datos observados de especies con coberturas climáticas, permitiendo determinar las zonas de confort bajo condiciones controladas.

3.3 Modelos de distribución de especies

3.3.1 ¿Qué es un modelo de distribución de especie?

Los modelos de distribución de especies (SDM en literatura en inglés) son programas computacionales que tienen sus orígenes en la década de los 70's (ZIMMERMANN *et al.*, 2010). Nacieron para modelar los patrones de distribución de determinadas especies frente a determinados patrones bioclimáticos (en formato raster), y se han mantenido en la misma línea de tendencia hacia la actualidad (CHEFAOUI, 2011; PLISCOFF & FUENTES, 2011) de modo que se han estado desarrollando continuamente hasta el punto de convertirse en la espina vertebral de los estudios de ecología y biodiversidad del siglo XXI (ZIMMERMANN, 2007; FLINT & FLINT, 2012).

Este tipo de modelos se encuentran simplificados respecto de la realidad, logrando representaciones parciales bajo periodos temporales definidos (MATEO *et al.*, 2011), pero cuentan con un amplio respaldo por parte de la comunidad científica, que se ha enriquecido con modelos que han demostrado representar patrones de movilidad de ciertas especies de forma acertada; siendo extrapolados incluso a condiciones inciertas, tales como las modelaciones bajo condiciones futuras de cambio climático (PHILLIPS, 2004; PHILLIPS *et al.*, 2006; WIENS *et al.*, 2009; BARROWS *et al.*, 2010; SINCLAIR *et al.*, 2010; CHEFAOUI, 2011; PLISCOFF & FUENTES, 2011; HOWARD *et al.*, 2014).

“Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de Cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y Modelos de Circulación Global de muy, muy alta resolución”.

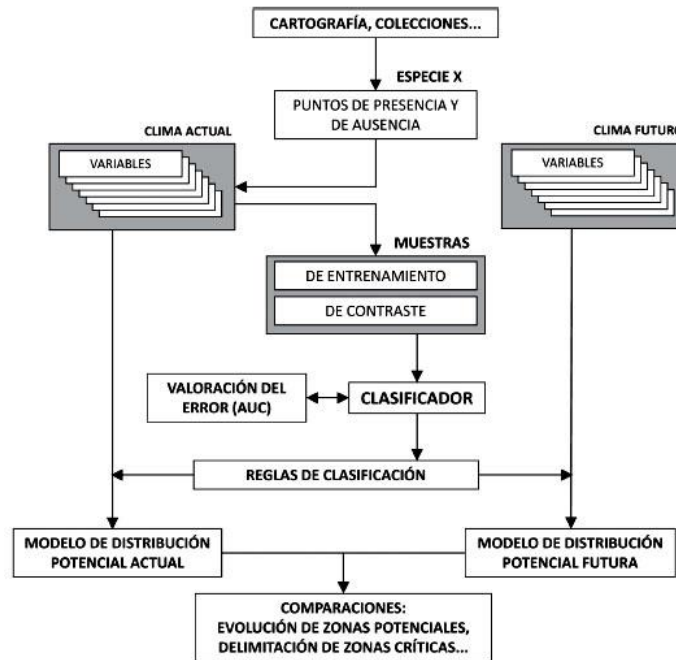


Figura N° 4: Funcionamiento general de los Modelos de Distribución de Especies. Fuente: MATEO *et al.*, 2011

El funcionamiento de estos modelos relaciona los datos provenientes de la entidad objetivo (especies, ecosistemas) con coberturas bioclimáticas (actuales y futuras), generando dos archivos principales de salida en formato raster: una con atributos determinísticos y otra con una variación binaria de posibilidad de presencia. Normalmente el modelo además genera una serie de datos que permiten al modelador identificar la validez del mismo. Este tipo de datos vienen presentes en curvas de respuesta (Curva AUC, curva de desempeño de datos) y permiten evaluar el modelo para determinar el grado de confianza de las predicciones realizadas.

3.3.2 ¿Para qué son necesarios los modelos de distribución de especie?

Los modelos de distribución de especies presentan múltiples ventajas potenciales. En primera instancia permiten mejorar el conocimiento respecto de la distribución potencial de especies posibilitando zonas de abundancia más óptimas para los estudios relacionados a observar y comprender su comportamiento y distribución, abarcando áreas del conocimiento arraigados a la biología y la ecología (PETERSON *et al.*, 2002; HORTAL *et al.*, 2005; GUIBAN & TULLIER, 2005).

Además se han utilizado extensamente para evaluar el impacto de especies invasoras (GONCALVES *et al.*, 2014; MOREIRA *et al.*, 2014; PEÑA-GOMEZ *et al.*, 2014) con la finalidad de comprender las posibles repercusiones que podrían generar sobre el sistema, y así poder evaluar planes de control y manejo para dichas especies, o para otras especies o sistemas que podrían verse afectados tanto directa como indirectamente.

En otro tipo de ámbitos, les permiten a los responsables de políticas y planificadores territoriales generar planes de priorización y organización de especies prioritarias, con el potencial de consumir esfuerzos en la re-estructuración de los sistemas de áreas protegidas: en pos de crearlas, mejorarlas u optimizarlas mediante la consideración de múltiples modelos en áreas de gran riqueza ecosistémica (GUIBAN & THULLIER, 2005; AUSTIN, 2007; HOWARD *et al.*, 2014). Esto es posible debido a que los Modelos de Distribución de especies pueden presentar localizaciones idóneas para una, o muchas especies/ecosistemas a la vez.

Finalmente, el uso de Modelos de Distribución de especie puede ser considerado al momento de proyectar planes económicos y productivos, al simular las condiciones climáticas ideales para planes agrícolas o actividades forestales, permitiendo la optimización de tiempo y recursos y posibilitando posibles planes de acción futuros.

3.3.3 ¿Qué tipos de modelos de distribución de especie existen?

Actualmente existen tres grandes grupos que clasifican a los Modelos de Distribución de Especie, siendo estos: a) basados en técnicas de Perfiles (*profile based*), b) basadas en técnicas de regresión (regression based) y c) basadas en técnicas de Aprendizaje (*machine learning*).

Los modelos basados en técnicas de perfiles (*profile techniques*) se caracterizan por sumar las características ambientales en las zonas de presencia de datos. En este tipo de modelos no se discrimina la distancia o la densidad de los registros (cada registro tiene el mismo peso ponderado en el modelo) ni se manejan datos de ausencia que calibren el modelo, y

resultan muy ventajosos si se cuenta con pocos registros de presencia (PEARSE & BOYCE, 2006).

En el caso de contar con una mayor cantidad de registro de datos, se puede dar uso a los grupos de modelos basados en técnicas de regresión. Estos se han manifestado por presentar mejores desempeños al incluir calibraciones mediante registros de ausencia, pero debe tenerse especial consideración en su uso directo como herramienta de modelación principal. PEARSE & BOYCE (2006) recomiendan que este tipo de modelos sea utilizado para contrastar a los modelos basados en perfiles de desempeño, al tener la capacidad de representar de manera más precisa la variación porcentual de un modelo en el espacio debido a la calibración procedida de los registros de ausencia.

Los puntos de ausencia pueden significar desafíos mayores, ya que estos pueden ser muy difíciles –o imposibles- de conseguir dependiendo de la fuente de los datos o de la especie utilizada para cada estudio (PEARSE & BOYCE, 2006). Es por esto que los modelos que consideran únicamente puntos de presencia fueron creados, ya que permiten la utilización de registros menos engorrosos de conseguir.

Finalmente el grupo de modelos basados en técnicas de aprendizaje (*machine learning*) busca suplementar al grupo de los modelos basados en perfiles de desempeño. Este método genera modelos en base a comportamientos que enseñan al software a extraer información desde la base de datos de entrada mediante un algoritmo programado, operando como una inteligencia artificial propia que construye una situación en base a los datos observados (MITCHELL, 1997). Sin embargo, este tipo de modelos tiende a comportarse muy distintamente según el software utilizado, pudiendo generar resultado altamente variados y requiriendo una constante y exhaustiva atención del modelador en el procedimiento. Este grupo posee la ventaja de mostrarse como una opción viable para operar grandes registros de datos de presencias (BHATTACHARYA, 2013), debido a su propia naturaleza: la generalización de patrones a través del aprendizaje artificial.

Nombre	Tipo Modelo
BIOCLIM	Perfiles de desempeño (<i>Profile techniques</i>)
ENFA	
DOMAIN	
GLM	Basados en regresión (<i>Regression based</i>)
GAM	
MARS	
MAXENT	Aprendizaje computacional (<i>Machine Learning</i>)
ANN	
GARP	
RF	
SVM	

Tabla N° 2: Ejemplos de software de modelación según grupo de modelos. Fuente: Elaboración propia en base a PEARSE & BOYCE (2006), WISZ *et al.* (2008) y BHATTACHARYA (2013).

Los modelos expresados en la tabla N°2 representan a aquellos más empleados en el campo de la modelo distribución de especies. Modelos basados en softwares como MAXENT y GARP son los más comúnmente utilizados en las recientes investigaciones que abarcan la modelación y distribución de especies (ZIMMERMANN *et al.*, 2010). A diferencia de la gran mayoría de los otros modelos existentes MAXENT se basa en algoritmos que operan desde la máxima entropía, permitiéndole identificar nichos potenciales en vez de basarse únicamente en relaciones estadísticas (PLISCOFF & FUENTES, 2011b).

La entropía corresponde a un concepto basado en la segunda ley de la termodinámica, y se explica como un estado inherente en los sistemas biológicos, donde se tiende a la condición de irreversibilidad producto de reacciones aleatorias y caóticas determinantes que siguen cierto orden predefinido (CARMONA, 2003). De esta forma, la máxima entropía busca responder la relación de máxima distribución posible si se consideran condiciones hipotéticas de modelación, ajustando los modelos a la mayor realidad posible dadas condiciones establecidas (PHILLIPS *et al.*, 2006) y otorgando la mayor probabilidad de presencia de la unidad modelada en el espacio.

3.3.4 Limitaciones y consideraciones de los modelos

Los modelos de distribución de especie presentan limitaciones claras, siendo determinantes aquellas ligadas a los datos climáticos que utilizan para realizar los modelos. Entre aquellas se encuentra la capacidad limitada para representar la realidad presente en los modelos; autores como MATEO *et al.* (2011) manifiestan la imposibilidad metodológica de intentar abarcar la totalidad de las condicionantes que podrían afectar a una especie/ecosistema dado que pueden ser no conocidas, o resultar complejas de transferir a un formato digital.

Otra limitación del mismo tipo de índole y que está presente en todos los modelos guarda relación con la resolución necesaria que deben presentar las capas climáticas y la densidad de los registros de presencia (en el caso de modelar ecosistemas). Todos estos deben encontrarse a la misma resolución de píxel, o de lo contrario la información espacial no podría ser igualmente comparada en todas las áreas, generando incertidumbres en las estimaciones (GUISAN & THULLIER, 2005; AUSTIN, 2007; SINCLAIR *et al.*, 2010). Recurrentemente podrían ocurrir este tipo de errores si se añadiesen capas bioclimáticas generadas por el usuario, y resulta necesario mantener especiales precauciones al momento de incluir nuevas capas, asegurándose que estas cumplan las mismas áreas y resoluciones espaciales.

Bajo la misma tendencia, modelar con resoluciones de píxel muy gruesas podría subestimar los modelos finales al generalizar los datos de un área que presente mayores variaciones. El desarrollo de los Modelos de Circulación Global ha ido a la par con el desarrollo de mejoras asociadas a la resolución de estos para proveer de datos que permitan los estudios de impacto en la comunidad científica (WILBY *et al.*, 2002; ZIMMERMANN, 2010)

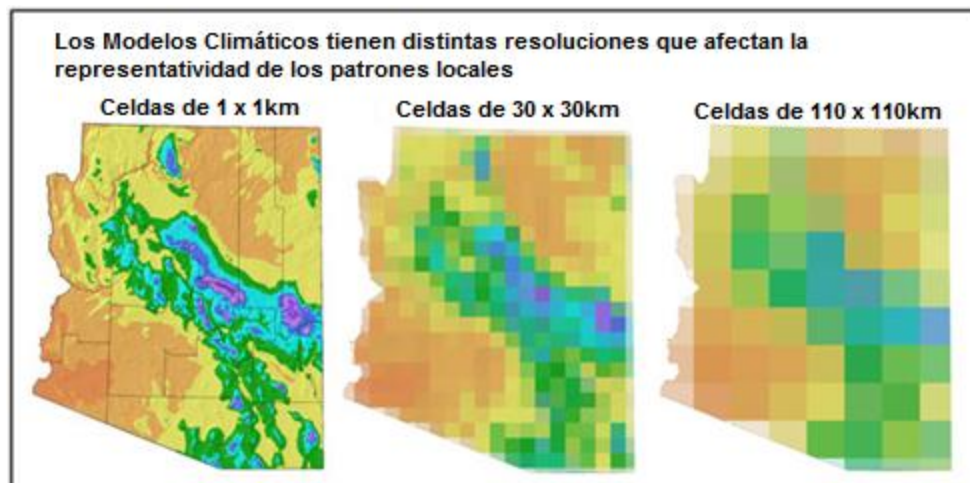


Figura N° 5: Cuadro de comparación que ilustra la mejora en la resolución de píxel en imágenes de Modelos de Circulación Global. Fuente: LENART (2008) en base al proyecto PRISM (1994). Obtenido de: <http://www.southwestclimatechange.org/climate/modeling/uncertainty-global>

De esta forma, la selección de la resolución de trabajo tendrá que ver con los requerimientos propios de las especies/ecosistemas y con la extensión y detalle del área de estudio abarcada.

Autores como MESQUITA & SOUSA (2009) manifiestan que las áreas modeladas deben ser menores que la extensión de las capas bioclimáticas para así evitar la extrapolación de áreas predichas cercanas a los bordes y reducir los errores asociados a modelar con zonas definidas. Este fenómeno es denominado “*edge effect*” (**efecto de borde**) y ha sido aplicado recientemente por autores como PLISCOFF *et al.* (2014) para modelar la variación de especies producto del uso de capas climáticas nacionales más detalladas.

En los Modelos de Circulación Global está presente su incapacidad de captar eventos climáticos locales (ej: microclimas) que ocurren en la actualidad o que puedan ocurrir en el futuro. Esta limitación viene asociada a factores como la resolución de píxel y la densidad y calidad de los datos de las estaciones climáticas desde las que se generan las capas bioclimáticas, además de la imposibilidad de adivinar y predecir eventos aleatorios (ej: erupciones volcánicas).

Otra índole de limitaciones vienen asociadas a aquellas intrínsecas de los modelos de distribución de especie. Autores como AUSTIN *et al.* (2006) y NORRIS (2014) plantearon que la capacidad predictiva final de un modelo dependería más de las habilidades propias del modelador en cuestión que de las particularidades de cada algoritmo. Este enfoque podría estar desvirtuando el énfasis inicial de los modelos de distribución de especies (responder preguntas ecológicas), al re-dirigir el desarrollo de modelos en satisfacer los requerimientos técnicos de quienes los evalúan. Por este motivo, resulta esencial poder escoger un algoritmo de modelación que se encuentre lo más validado posible, a modo de intentar reducir este tipo de sesgos asociados.

Respecto de la selección de presencias, se conocen limitantes asociadas a la cantidad de datos de registro y la variedad de las fuentes de información. Autores como PROOSDIJ *et al.* (2015) plantean que los modelos de distribución de especie tales como MAXENT requieren un mínimo ideal de 35 registros de presencia para operar adecuadamente. Contrariamente una cantidad máxima de registros no ha sido adecuadamente definida; ciertos autores (PLISCOFF & FUENTES, 2011; MARQUET *et al.*, 2014) plantean que la modelación con muchos puntos de presencia aplicados a la modelación de ecosistemas es perfectamente realizable. De hecho existen algunos casos de estudio como son los de GORMLEY *et al.* (2011) donde se utilizaron 10.000 registros de presencia de una sola especie, logrando óptimos resultados.

Otro ámbito a considerar al momento de manipular registros de presencias debe estar en torno al factor de sesgo que estas tengan. El factor de sesgo se define como el nivel de incertidumbre que maneja determinado modelo producto de las preferencias personales derivadas de quienes recolectan los registros (GUISAN & THULLIER, 2005). SINCLAIR *et al.* (2010) plantea que este factor es difícil de eliminar, pero que puede ser reducido ampliando el origen de las bases de datos de los registros y considerando tantas fuentes de datos como sean posibles.

La proyección de modelos de distribución de especies a escenarios futuros presentan dos grandes desventajas: a) los escenarios modelados sólo podrán considerar variables que puedan ser extrapoladas a condiciones futuras (ej: variables bioclimáticas) debido a la imposibilidad de construir capas de variables (ej: NDVI) que aún no se sabe cómo se comportarán (GUISAN & THULLIER, 2005; MORALES, 2012). Esta desventaja producirá escenarios simples, que deberán ser evaluados conforme se avanza en el tiempo y a medida que ocurran los cambios a las tasas esperadas; y b) la proyección de los modelos climáticos futuros estarían más propensos a generar falsos positivos (no detectables por el modelo) debido a que las condiciones climáticas podrían estar variando mucho más de lo esperado, propiciando condiciones aptas de desarrollo en zonas donde ciertas especies no podrían sobrevivir (GUISAN & THULLIER, 2005).

3.3.5 Formas de validar modelos de distribución de especie

Los modelos de distribución de especie presentan elementos en común que les permiten su evaluación respecto de su capacidad predictiva propia (VALVERDE, 2012). Al ser elementos comunes tienen la capacidad adicional de comparar el desempeño de varios modelos de distintos algoritmos entre sí (WISZ *et al.*, 2008). Estos elementos vienen determinados por la curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*), y el valor numérico de la AUC (*Area Under the Curve*), que vendría siendo el área sobre la predicción al azar de la curva ROC.

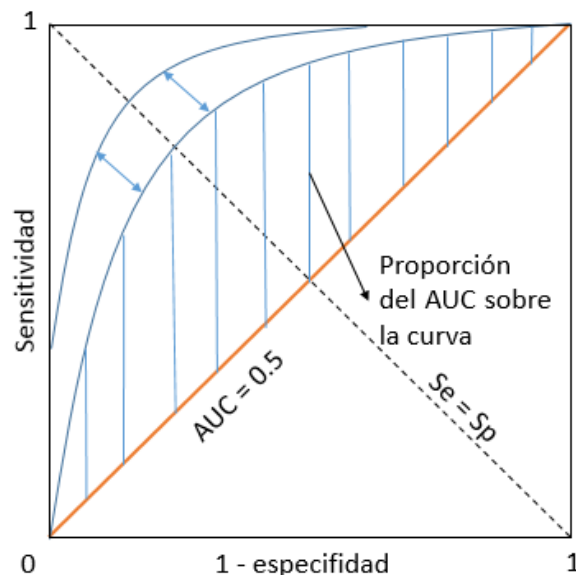


Figura N° 6: Curva ROC. Fuente: Elaboración propia en base a VALVERDE (2012).

Esta curva interseca los valores de “sensibilidad” y “especificidad” con “1 – especificidad”. La sensibilidad corresponde a la proporción de registros de presencia correctamente modelados como presencia, y la especificidad a los puntos de pseudo-ausencia correctamente identificados como ausencias. El término “1 – especificidad” corresponde a los casos de ausencia erróneamente predichos como presencias, pudiendo variar entre 0 a 1 o 0% y 100% indistintamente (VALVERDE, 2012). Si los valores de la AUC son menores que 0,5 querrá decir que los valores predichos no serán mejores que el azar (PHILLIPS *et al.*, 2006; VALVERDE, 2012). Si los valores de la curva se pliegan rápidamente a valores altos del AUC, se querrá indicar que el modelo se manifiesta con pocos errores de pseudo-ausencias identificadas como presencias.

3.4 Cambio climático

El avance en las tecnologías pone a disposición nuevas herramientas para la humanidad, ayudándola a profundizar su comprensión respecto del funcionamiento del sistema terrestre en torno a su comportamiento climático pasado y presente; y del comportamiento que podría llegar a experimentar en los años venideros producto de los efectos del *Cambio Climático*.

3.4.1 ¿Qué se sabe del cambio climático y porqué es importante estudiarlo?

Este fenómeno ha sido estudiado por diversos organismos mundiales. El más importante corresponde al *Panel Intergubernamental de expertos para el Cambio Climático* (IPCC), reúne a científicos de la mayoría de los países que conforman la ONU e investigan activamente el fenómeno. El recientemente publicado quinto informe (2013-2014) cataloga al cambio climático como un proceso innegablemente producido por el ser humano, generado por mayores concentraciones de *Gases de Efecto Invernadero* (GEI) a escala planetaria, que se encuentran sobrepasando desde el año 1950 todos los registros existentes a niveles sin precedentes, y calentando la tierra también, a niveles nunca antes registrados.

Los impactos son tan evidentes que ciertos autores (FLINT & FLINT, 2012) han argumentado que los efectos de calentamiento global seguirán ocurriendo durante siglos, sin importar las medidas que el hombre lleve a cabo para intentar aminorarlo, impactando los ecosistemas en todo el mundo y afectando tanto la vida de humanos como animales.

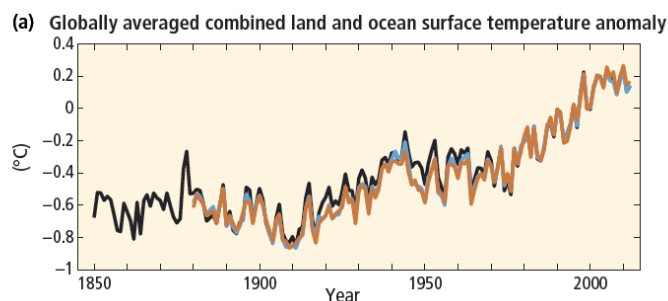


Figura N° 7: Aumento de temperaturas globales desde el año 1850 al año 2000. El color café sugiere las temperaturas terrestres, el azul sugiere las temperaturas oceánicas y el negro sugiere la temperatura combinada de ambas. Fuente: IPCC (2014).

El seguimiento del estado del fenómeno se realiza a través de la medición histórica de los GEI. Estos gases están existentes en la atmosfera de manera natural y permiten la vida en la tierra al atrapar cierta proporción de la energía solar incidente -y de la energía emitida por la tierra en la atmosfera terrestre-, permitiendo condiciones térmicas adecuadas. Estos gases se componen de variadas concentraciones de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O).

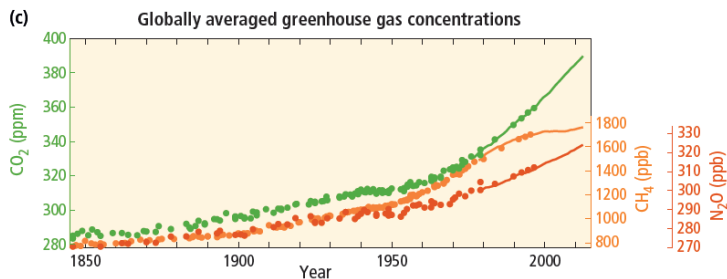


Figura N° 8: Concentraciones mundiales de GEI observados desde el año 1850 al año 2000. Fuente: IPCC (2014).

El IPCC ha observado desajustes en los niveles naturales de estos gases desde el año 1850 (revolución industrial) a la actualidad, las mediciones se realizan a través del análisis de las temperaturas terrestres y oceánicas (para los últimos 100 años) y del estudio de testigos de hielo (hasta 200 años al pasado respecto del presente). Este tipo de resultados han sido avalados por numerosos integrantes de la comunidad científica a escala global, reafirmando la tendencia de calentamiento global desde principios del siglo XIX bajo un sustento crítico multidisciplinar.

Este calentamiento se cuantifica a través de la producción de un “*Forzamiento Radiativo Positivo*”, y ocurre a raíz de un desbalance global que está estresando al sistema más allá de su capacidad de regulación natural. Producto de la mayor cantidad de energía incidente capturada; la desregulación de los sistemas globales desencadena una aceleración en los flujos, desatando aceleradas variaciones climáticas a multi-escala que se espera generen eventos extremos más comunes (IPCC, 2013). Los eventos tendrán tendencias más cálidas que frías, y serán más violentos en las zonas tropicales del globo (CONAMA, 2006: 17).

La aceleración de los sistemas globales ha producido variados efectos negativos sobre la tierra, destacando el incremento observado en el nivel medio del mar, el incremento de las zonas desérticas, la acidificación de los océanos, la ocurrencia de tormentas tropicales más poderosas y el derretimiento del hielo ártico y de la mayoría de los glaciares en gran parte del mundo, entre muchas otras.

De igual manera, el Panel propone los posibles escenarios futuros en el caso que la humanidad tome medidas ya sean drásticas, medias o nulas. “*Los escenarios permiten*

“Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de Cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y Modelos de Circulación Global de muy, muy alta resolución”.

anticipar medidas y planes de acción futuros para mitigar los posibles cambios físicos en los sistemas humanos y naturales” (WAYNE, 2013), por lo que resulta vital estudiarlos a fondo, y comprender sus implicancias, para focalizar recursos y planes que ayuden a los estados y entidades humanas a prepararse estructural y económicamente frente al futuro climático planetario.

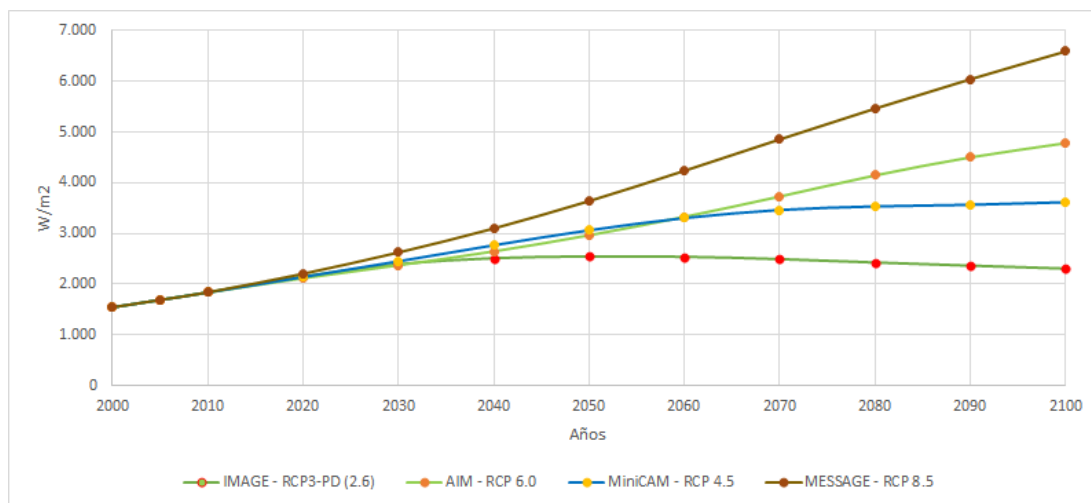


Figura N° 9: Intensidad comparativa en los escenarios RCP medida en W/m^2 propuestos por el IPCC. Fuente: Elaboración propia a partir de RCP Database (2015); obtenido de: <http://tntcat.iiasa.ac.at:8787/RcpDb/dsd?Action=htmlpage&page=compare>

A partir del quinto informe del IPCC (2013-2014), se abordó la creación de cuatro nuevos escenarios futuros de cambio climático. Estos buscan reemplazar a los propuestos en los dos informes anteriores (escenarios SRES), debido a que han ocurrido reajustes en las mediciones globales de GEI (WAYNE, 2013); los escenarios son denominados como Vías de Concentración Representativas (*Representative Concentration Pathways* o RCP en inglés), y representan la cantidad de energía acumulada (W/m^2) presente en la atmosfera, correspondiendo a cuatro:

- **Escenario RCP 2.6:** Escenario Optimista. Estima concentraciones de 3 W/m^2 al año 2050, con medidas menores a $2,7 \text{ W/m}^2$ al año 2100. Esto es lo que se cree que podría ocurrir si las emisiones de GEI fueran reducidas drásticamente entre los años 2015-2020.
- **Escenario RCP 4.5:** Escenario Intermedio. Estima concentraciones mayores que el escenario siguiente hasta el año 2060, estas emisiones luego serían proporcionalmente menores, estabilizándose hacia el año 2080 y alcanzando concentraciones máximas de $4,31 \text{ W/m}^2$ al 2100.
- **Escenario RCP 6.0:** Escenario Intermedio. Sus concentraciones serían mayores que el escenario anterior sólo después del año 2070, con una tendencia a estabilizar sus concentraciones al año 2100 en valores no superiores a $5,48 \text{ W/m}^2$.
- **Escenario RCP 8.5:** Escenario Pesimista. Sus concentraciones serían mayores a cualquier otro escenario desde el año 2030 en adelante. No se espera que ocurran estabilizaciones a fin de siglo, superando valores de $8,38 \text{ W/m}^2$.

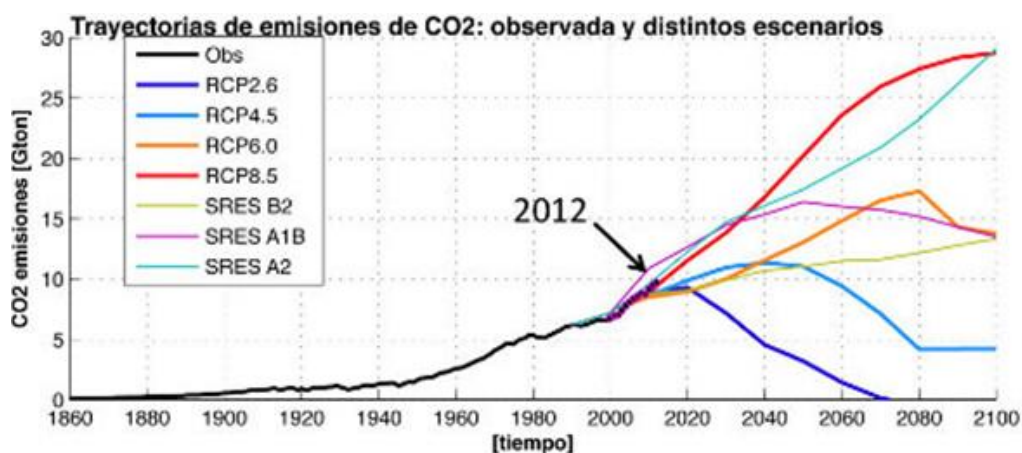


Figura N° 10: Curva de concentración RCP expresada giga toneladas de emisiones previstas de CO₂ y su comparación respecto de los escenarios del cuarto informe del IPCC. Fuente: CR2 2014. En base a IPCC 2014. Obtenido de: <http://www.cr2.cl/ultimo-informe-del-ipcc-evidencias-del-calentamiento-global/>

La única forma existente de comprobar el cumplimiento de los escenarios propuestos es dejar que el tiempo avance. El análisis del (CR)² para el quinto informe del IPCC (2014) incluye las medidas estimadas de CO₂ (en Giga-toneladas) hasta el año 2012 para Chile. Los resultados indican que la línea de tendencia se encuentra entre los escenarios SRES

A2 (escenario pesimista; correspondiente al tercer y cuarto informe del IPCC) y RCP 8.5, resultando en condiciones poco optimistas que harían disminuir las precipitaciones del centro/sur del país en un 5%, además de propiciar un leve aumento en la intensidad de las precipitaciones del norte del país. El (CR)² enfatizó que resulta fundamental incorporar medidas de mitigación al cambio climático en los planes de adaptación social y ecosistémica para poder responder a este tipo de situaciones futuras y evitar desastres ambientales y pérdidas humanas y económicas significativas.

3.4.2 Modelos de circulación global y regional

Bajo este contexto, el desarrollo de los *Modelos de Circulación Global* (GCM) significó una mejora invaluable, al representar físicamente el funcionamiento de los sistemas (atmósfera, océanos) y subsistemas globales (ciclos biogeoquímicos, etc) bajo modelos basados en leyes físicas comprobadas representadas mediante imágenes que enlazan la información de miles de estaciones de monitoreo climático, y generando información cuantitativa validada ampliamente por la comunidad científica (LEEMANS & CRAMER 1991; NEW *et al.*, 2001; HIJMANS *et al.*, 2005; FLINT & FLINT 2012). Esgrimiéndose cómo una herramienta robusta para representar y predecir la variabilidad climática del sistema terrestre, que ha pasado a estructurar la espina vertebral de los estudios hidrológicos y ecológicos del siglo XXI (ZIMMERMANN, 2007; FLINT & FLINT, 2012).

Sin embargo la utilización de los GCM para la realización de estudios de impacto supone claras limitaciones, siendo quizás la escala de salida la más importante, debido a que el tamaño de píxel de estos modelos se supone en áreas de 275km², en que resulta increíblemente difícil representar contextos regionales, o modelar flujos eco-sistémicos donde ocurran cambios a niveles más finos que los representados por el modelo (WILBY *et al.*, 2002). Estas dificultades son magnificadas en zonas geográficamente accidentadas, y/o con amplias variaciones térmicas y en zonas con escasa cobertura de estaciones de monitoreo como los Andes sudamericanos (HIJMANS *et al.*, 2005).

Este tipo de desafíos ha dado paso al desarrollo de otras metodologías: Los *Modelos de Circulación Regional* o RCM y el *Downscaling* (WILBY & DAWSON, 2007). Ambas se caracterizan por permitir imágenes con mayores grados de detalle, sin significar la pérdida de información original en el proceso de obtención de las mismas.

La principal diferencia entre estas radica en el grado y forma de agregación de información adicional. Los RCM simulan sub-condiciones de los GCM, incorporándoles patrones de variación locales (hidrología, vegetación, topografía, etc) y otorgándoles mayor precisión horizontal pero, limitados hacia áreas de interés más reducidas, que no incluyen la representación global de flujos cómo el cambio global de GEI (METOFFICE, 2014; IPCC,

2001). Además presentan escalas de salida máximas de 10km² debido al alto requerimiento en insumos tecnológicos que demandan; los RCM resultan más adecuados que los GCM en zonas donde existen altas diferencias altitudinales, líneas de costa, y vegetación con características muy diferentes, siempre y cuando la información final a analizar no sea demasiado fina en términos de escala.

3.4.3 Tipos y métodos de downscaling existentes

El Downscaling es un procedimiento que permite trabajar información espacial proveniente de los GCM desde grandes a pequeñas escalas, permitiendo la realización de estudios a mayor detalle (HOAR & NYCHKA, 2008; ZIMMERMANN, 2010) y conectando la brecha existencial entre el potencial intrínseco de los GCM.

Integra el funcionamiento de los sistemas y subsistemas globales, con lo requerido por los científicos para realizar estudios de impacto (BARROW, s/a; WILBY & DAWSON, 2002). El método ha sido aplicado en extensas ramas de las ciencias biológicas (NINYEROLA *et al.*, 2005; ZIMMERMANN, 2010; PLISCOFF *et al.*, 2014), la agricultura y el cambio climático (HIJMANS *et al.*, 2005; RANHAO *et al.*, 2008; BARROWS *et al.*, 2010).

Para autores como WILBY & DAWSON (2007) existen cuatro tipos de downscaling: 1) De modelamiento climático dinámico, 2) de tipificación sinóptica climática, 3) de generación climática estocástica y 4) de aproximaciones de funciones de transferencia. Pero según ellos, la comunidad científica sólo limita a referirse a *Downscaling Estadístico* y *Downscaling Dinámico*, donde el tipo de Downscaling pasa a ser el modo específico de aproximación al resultado final.

Downscaling Estadístico: El Downscaling estadístico se obtiene desde la operación de procesos matemáticos que buscan relaciones entre sus propios datos para producir condiciones regionales mediante datos globales². A Diferencia del Downscaling Dinámico, el Downscaling Estadístico no requiere datos adicionales (topografía, hidrología, vegetación, etc) para ser producido ni equipos tecnológicos especiales, resultando notoriamente más accesible y utilizado por la comunidad científica (WILBY & DAWSON, 2007; HIDALGO *et al.*, 2008). Comúnmente, se recomienda la utilización de varios GCM para producir una visión de ensamble, con la finalidad de calibrar el resultado final del proceso, y excluir las excentricidades propias de cada GCM (MARKE *et al.*, 2011).

Downscaling Dinámico: El Downscaling dinámico se asemeja a un RCM porque se obtiene desde el procesamiento de una gran cantidad de datos locales anexados al GCM que son

² <http://www.southwestclimatechange.org/climate/modeling/downscaling>

combinados en un nuevo ensamble, produciendo información detallada (pudiendo incluir un RCM en el proceso de refinamiento), y requiriendo un alto consumo en equipos tecnológicos (WILBY & DAWSON, 2007). HIDALGO *et al.* (2008) plantea que este método no resulta óptimo debido a su alto costo, ni resulta viable para realizar simulaciones multi-decadales o multi-modelos si se utiliza un GCM para iniciar el proceso. Además, el procedimiento tiende a aislar el contexto global que ocurre fuera del área modelada, afectando negativamente la capacidad predictiva del mismo (WILBY & DAWSON, 2007).

3.4.4 Estudios que han logrado niveles de downscaling a muy, muy altas resoluciones.

Existe una tendencia a generar metodologías de Downscaling cada vez más finas, existen las desarrolladas recientemente por diversos investigadores como NINYEROLA *et al.* (2005), RANHAO *et al.* (2008), ZIMMERMANN (2010), FLINT & FLINT (2012) y ZIMMERMANN *et al.* (2014), que han logrado niveles de detalle muy finos de hasta 90m de resolución en diversas zonas del mundo como Europa occidental y parte de China. Estos métodos se caracterizan por utilizar procedimientos de Downscaling Estadístico que involucra regresiones lineales y regresiones lineales múltiples en conjunto con Sistemas de Información Geográfica (SIG) a fin de lograr los mejores resultados posibles.

El uso de ecuaciones de regresión busca corregir los errores asociados en la generación de nueva información a menor escala, para relacionar los valores celda por celda respecto de variables que podrían influir en el clima (NINYEROLA *et al.*, 2005; ZIMMERMANN, 2010), permitiendo “calibrar” la información de lugares donde la cobertura climática (densidad de estaciones) es pobre, al relacionar otro tipo de condicionantes al comportamiento climático cómo lo son la latitud, la longitud, la altitud y los indicadores de continentalidad.

3.4.5 Tipos y aplicaciones de los modelos de circulación en Chile.

En la línea base del proyecto WORLDCLIM propuesto por HIJMANS *et al.* (2005) se manifiesta la existencia de claros errores en las zonas como el sur de los Andes en Sudamérica, que son zonas con amplios accidentes geográficos y baja densidad de estaciones climatológicas. Los errores altimétricos vienen determinados en la capa utilizada para realizar la interpolación: El DEM GTOPO30 posee zonas vacías de datos en áreas con abruptas variaciones altitudinales (ZIMMERMANN, 2010), de forma que los autores del proyecto WORLDCLIM no recomiendan el uso de su base climática para este tipo de zonas.

Estas zonas abarcan al área de estudio, siendo imperativo el poder considerar otras fuentes de datos para realizar la metodología. Afortunadamente existe una línea de base generada mediante la misma metodología, que ha sido calibrada para la totalidad del territorio nacional por PLISCOFF *et al.* (2014), y tiene la característica de considerar una mayor cobertura de estaciones climáticas, además de interpolar la altitud con un DEM SRTM_2 corregido a 1 kilómetro de resolución (el ajuste de las variables a la altitud se realizó mediante SPLINE usando el software ANUSPLIN).

Las estaciones que consideran pertenecen a la base de datos de FAOCLIM (2001), y a una serie de publicaciones científicas chilenas (HAJEK & DI CASTRI, 1975; AMIGO & RAMÍREZ, 1998; RIVAS-MARTÍNEZ *et al.*, 2003; LUEBERT & PLISCOFF, 2006) que conforman una red final de 930 estaciones para Chile y parte de Argentina, Bolivia y Perú.

Este modelo climático presenta coberturas para diecinueve variables bioclimáticas (las mismas que el proyecto WORLCLIM) para el sur de Sudamérica, que han sido calibradas para captar mejor algunos efectos como es la sombra de lluvias por condicionante orogénica, o las abruptas variaciones de temperatura en zonas montañosas y los extremos del país. Las coberturas se encuentran disponibles a resolución de 1 kilómetro aproximado (0,86*0,86 metros) para un periodo temporal denominado Línea base, que abarca las ponderaciones mensuales de los datos observados entre los años 1950 a 2000, permitiéndole su utilización en estudios biogeográficos. Esta información puede ser libremente descargada en: <<https://www.unil.ch/ecospat/en/home/menuguid/ecospat-resources/data.html>>

4. Marco metodológico

A continuación se presentan los métodos y procedimientos que hicieron posible la realización de la presente memoria de título. Se exponen además, los procedimientos intermedios para llegar a los resultados obtenidos, tales como ajustes y validación de los modelos de distribución de especies y creación de las variables bioclimáticas a 3 arc segundos, entre otras.

4.1 Variables bioclimáticas

Se empleó como línea base las variables bioclimáticas propuestas por PLISCOFF *et al.* (2014), ya que presentan ventajas comparativas significativas para modelar con el norte de Chile respecto de las variables mundiales del proyecto WORLDCLIM (HIJMANS *et al.*, 2005), gracias a su mayor precisión y capacidad para captar efectos de sombra pluviométrica debida a la orografía, al incorporar una matriz de estaciones climáticas más detallada.

Etiqueta	Variable	Factor de Escala	Unidades	
BIO1	Temperatura media anual	10	Grados	
BIO2	Rango medio diurno de temperatura	10	Celsius	
BIO3	Isotermabilidad	100	-	
BIO4	Estacionalidad de las temperaturas	100	Grados Celsius	
BIO5	Temperatura máxima del mes más cálido	10		
BIO6	Temperatura mínima del mes más frío	10		
BIO7	Rango anual de temperaturas	10		
BIO8	Temperatura media del mes más húmedo	10		
BIO9	Temperatura media del trimestre más seco	10		
BIO10	Temperatura media del trimestre más cálido	10		
BIO11	Temperatura media del trimestre más frío	10		
BIO12	Precipitación anual	1		Milímetros
BIO13	Precipitación del mes más húmedo	1		
BIO14	Precipitación del mes más seco	1		
BIO15	Estacionalidad de las precipitaciones	100	Fracción	
BIO16	Precipitación del trimestre más húmedo	1	Milímetros	
BIO17	Precipitación del trimestre más seco	1		
BIO18	Precipitación del trimestre más cálido	1		
BIO19	Precipitación del trimestre más frío	1		

Tabla N° 3: Cuadro de 19 Variables bioclimáticas. Fuente: Elaboración propia en base a CCAFS (s/a) extraído de: <http://www.ccafs-climate.org/downloads/docs/bioclimatic-variables.pdf>

Las variables se componen de un total de diecinueve y varían entre temperatura (BIO1 a BIO11) y precipitación (BIO 12 a BIO 19), abarcando todo el sur de Sudamérica, mediante datos observados entre los años 1950 – 2000 (que conforman una línea base).

Para la obtención de las coberturas necesarias para generar escenarios futuros de cambio climático, se adoptó la metodología de anomalías propuesta por BUYTAERT *et al.* (2009), que ha sido aprobada por autores como ZIMMERMANN *et al.* (2010), y PLISCOFF *et al.* (2014) en la obtención de escenarios pertenecientes al cuarto informe del IPCC (2007). La metodología permite la generación de coberturas climáticas para cualquier escenario de cambio climático existente.

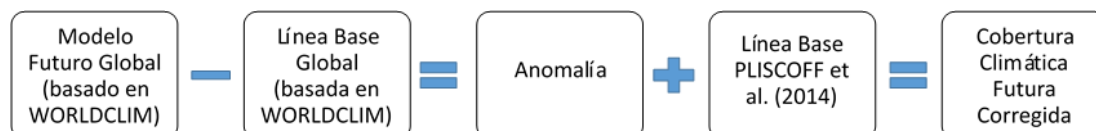


Figura N° 11: Procedimiento de obtención de Anomalías y nuevas capas climáticas para modelar escenarios de cambio climático futuro en Chile. Fuente: Elaboración propia en base a BUYTAERT *et al.* (2008).

Las variables de línea base y GCM futuros basados en WORLDCLIM fueron obtenidas libremente desde las bases de datos de WORLDCLIM y CCAFS respectivamente (este último es el responsable de procesar las proyecciones bioclimáticas a resolución de 30 arc segundos), y posteriormente fueron cortadas para coincidir con la extensión espacial de las variables de PLISCOFF *et al.* (2014) puesto que originalmente abarcan la totalidad del planeta. Este proceso requiere procesar grandes cantidades de datos (aproximadamente 100-150 GB de espacio en el disco duro por cada modelo GCM ensamblado) y demanda grandes cantidades de tiempo (aproximadamente 30 horas de procesamiento ininterrumpido), y resulta necesario ser extremadamente cuidadoso en el proceso, evitando la incidencia de errores en lo posible.

Se requiere especial consideración con las variables bioclimáticas pertenecientes a la medición de precipitación, debido a situaciones que indican proyecciones muy inferiores a las anomalías de la línea base, porque se estarían generando variables bioclimáticas con valores negativos. Para solucionar este problema, se debe incluir un formato condicional para llevar a 0 los valores negativos (en las variables de precipitación), a fin de normalizar este tipo de sub-estimaciones.

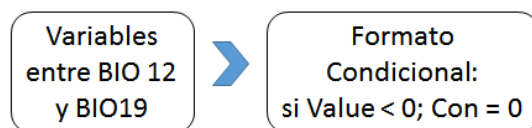


Figura N° 12: Aplicación de formato condicional a variables de precipitación sometidas al método de anomalías de BUYTAERT *et al.* (2008). Fuente: Elaboración propia.

4.2 Ensamble de Modelos GCM

El ensamble de modelos GCM se realiza con la finalidad de reducir las singularidades de cada modelo (MARKE *et al.*, 2011; ZIMMERMANN *et al.*, 2014). En el caso del norte de Chile, los modelos existentes tienden a exagerar o menoscabar los registros de precipitación dependiendo del GCM en cuestión, y contar con una batería de modelos climáticos globales ensamblados resulta una buena alternativa, a fin de reducir las particularidades asociadas a cada modelo GCM y contar con un modelo final más preciso.

“Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de Cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y Modelos de Circulación Global de muy, muy alta resolución”.

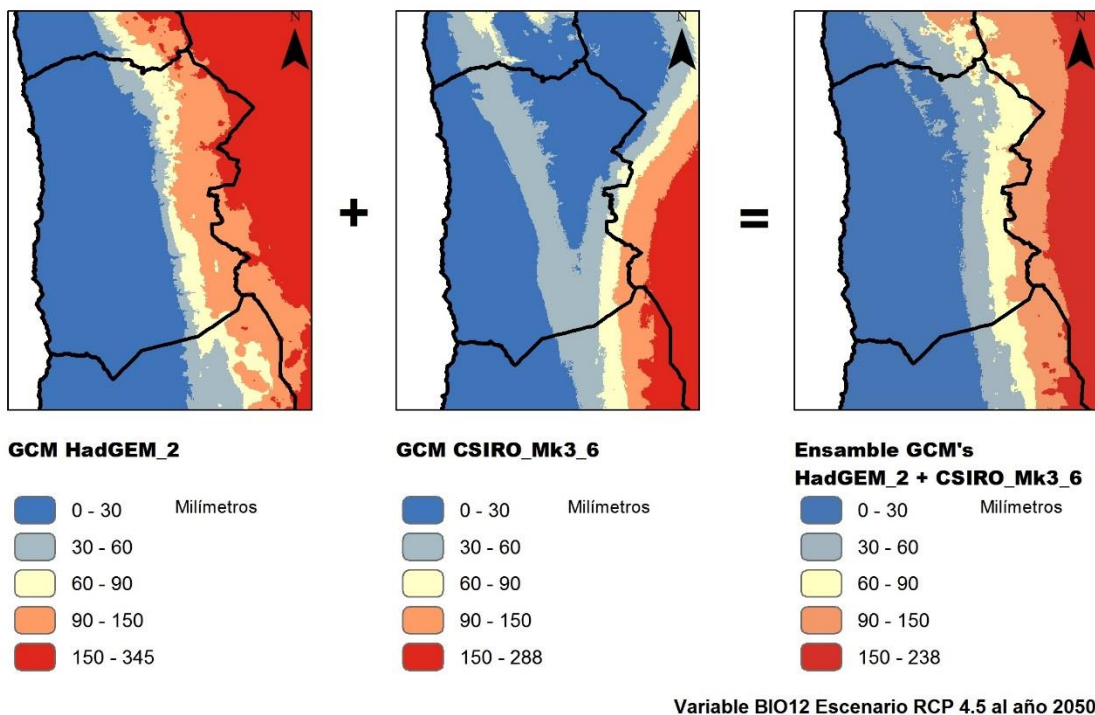


Figura N° 13: Comparación entre Escenarios GCM HadGEM_2 y CSIRO_Mk3_6 para el escenario RCP 4.5 al año 2050. Fuente: Elaboración propia.

Para esta memoria de título se procedió a operar con el ensamble de GCM'S HadGEM_2 y CSIRO_Mk3_6 debido al potencial combinado de ambos.

El modelo HadGem_2 fue desarrollado por la MetOffice y la Unión Europea, y presenta un buen desempeño a nivel global según el ranking realizado por el CCAFS, localizándose dentro del 95% de confiabilidad. Este modelo tiende a exagerar levemente los datos de precipitación y temperaturas para el sur de Sudamérica y los andes Chilenos.

En cambio, el Modelo CSIRO Mk-3.6 fue desarrollado conjuntamente por el *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation* (CSIRO) y el *Queensland Climate Change Centre of Excellence* (QCCCE) en Australia (JEFFREY *et al.*, 2012). Este modelo es el último integrante de una extensa familia de modelos climáticos y ha sido adoptado por del CR2 en Chile como el Modelo de Circulación Global para estimar el cambio climático futuro.

No obstante, tiende a ser poco preciso respecto a las mediciones de precipitación en el sector de los Andes de Sudamérica debido a que considera muy poco a la barrera orográfica y su hegemonía en las precipitaciones.

Entonces, las fortalezas y debilidades de cada modelo son consideradas al momento de realizar el ensamble de los modelos climáticos, de modo que el nuevo modelo GCM generado contenga las ponderaciones de cada uno de los modelos incluidos.

4.3 Selección de escenarios RCP

Recientemente el quinto informe del IPCC (2014) ha promovido la utilización de escenarios RCP, estos escenarios tienen la capacidad de representar los procesos de transformación climática asociados a la actividad antrópica, tales como el cambio mundial en el uso y manejo de suelo y en el aumento en las emisiones de Gases de Efecto Invernadero a escala mundial. Los escenarios se encuentran representados en GCM's con resolución de hasta 30 arc segundos (1km).

Para esta memoria de título se optó por trabajar con los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 debido a que estos representan el escenario medio optimista y el escenario pesimista al 2050 (futuro cercano). La adopción del año 2050 se encuentra con la finalidad de poder apreciar mayores cambios respecto del año 2030, donde los escenarios no alcanzan a diferenciarse ampliamente; manteniendo la temporalidad de un futuro cercano, sin alejarse demasiado en la proyección temporal (caso del año 2080).

La no utilización del escenario RCP 2.6 deriva en la temporalidad de este estudio, y en la agresividad propia del modelo al año 2050. Se espera que para dicho momento, el escenario RCP 2.6 ya haya alcanzado su punto de estabilización que resulta levemente superior (en casi $0,7 \text{ W/m}^2$) al escenario al año 2020. Además, están las condiciones estructurantes necesarias para permitir su desempeño esperado: este sólo será posible si se reducen notoriamente las emisiones mundiales de GEI a más tardar al año 2020. Además, en vista de las recientes observaciones aplicadas por el CR2 para Chile, al detectar que las emisiones actuales estarían muy cercanas al escenario RCP 8.5 (peor escenario posible), el escenario RCP 2.6 sería una posibilidad que sólo podría mantenerse intacta (al año 2050) si las emisiones mundiales de GEI cesasen aún más abruptamente que lo establecido.

Por otra parte, el escenario RCP 4.5 podría resultar más agresivo que el escenario RCP 6.0 en términos de emisiones de W/m^2 , esto se debe a la temporalidad del año 2050.

Las proyecciones estiman que para dicho año el escenario RCP 4.5 presentaría concentraciones de energía (W/m^2) mayores que el escenario RCP 6.0 (a pesar que las emisiones de giga toneladas sean menores). Esta relación sólo se invertiría en el año 2070.

4.4 Selección de variables bioclimáticas

En el proceso de modelación de especies resulta necesario seleccionar variables a fin de evitar generar resultados poco representativos e información poco relevante que saturen los modelos. GUISAN & THULLIER (2005) sostienen este supuesto respaldando que los modelos de distribución de especie funcionan mejor con una limitada cantidad de variables.

Para esto, se procedió a realizar una selección de variables bioclimáticas mediante la aplicación del índice de correlación de Pearson (aunque otros autores han utilizado para tales efectos el índice de Spearman) y el Análisis de Componentes Principales (ACP) a través de la plataforma *Statistical Product and Service Solutions* v.18 (SPSS v.18).



Figura N° 14: esquema metodológico en la selección de variables bioclimáticas. Fuente: Elaboración Propia.

El índice de correlación de Pearson busca determinar el grado de similitud entre un conjunto de datos de una recta a su línea de pendiente, sí los valores de correlación se acercan a 1 quiere decir que el conjunto de datos se presentan con altos valores de similitud entre ellos, en cambio, sí se acercan a 0 quiere decir que los datos se presentan con pocos valores de similitud entre ellos (CALKINS, 2005). La correlación de variables entonces resulta necesaria para definir patrones representativos en la información (MARQUET *et al.*, 2014), y así evitar la saturación de información.

El índice de Pearson determina valores tanto positivos como negativos, siendo el signo el indicador de orientación de la pendiente en la recta (valores positivos = pendiente positiva; valores negativos = pendiente negativa). Su grado de correlación no se ve afectado por su signo (+/-), ya que este depende de la cercanía entre 0 y 1 y no de la pendiente de orientación.

Para permitir la comparación de los datos, se procedió a la estandarización de todos los valores de correlación (r) a signo positivo (+), dando como resultado dos matrices: una para temperatura y otra para precipitación. La elección de dos matrices en vez de una sola busca generar una selección inter-específica entre dos grupos de variables, que generan distintos resultados en el comportamiento de los ecosistemas y especies modeladas.

“Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de Cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y Modelos de Circulación Global de muy, muy alta resolución”.

Coeficiente de Correlación												
	bio1	bio2	bio3	bio4	bio5	bio6	bio7	bio8	bio9	bio10	bio11	Media
bio1	1	0,09	0,43	0,42	0,93	0,96	0,37	1	0,99	1	0,99	0,74
bio2	0,09	1	0,71	0,36	0,25	0,34	0,93	0,08	0,14	0,06	0,14	0,37
bio3	0,43	0,71	1	0,08	0,63	0,26	0,41	0,42	0,41	0,44	0,4	0,47
bio4	0,42	0,36	0,08	1	0,18	0,45	0,52	0,35	0,49	0,35	0,52	0,43
bio5	0,93	0,25	0,63	0,18	1	0,81	0,03	0,94	0,89	0,94	0,89	0,68
bio6	0,96	0,34	0,26	0,45	0,81	1	0,6	0,95	0,96	0,95	0,96	0,75
bio7	0,37	0,93	0,41	0,52	0,03	0,6	1	0,35	0,42	0,34	0,42	0,49
bio8	1	0,08	0,42	0,35	0,94	0,95	0,35	1	0,98	1	0,98	0,73
bio9	0,99	0,14	0,41	0,49	0,89	0,96	0,42	0,98	1	0,98	0,99	0,75
bio10	1	0,06	0,44	0,35	0,94	0,95	0,34	1	0,98	1	0,98	0,73
bio11	0,99	0,14	0,4	0,52	0,89	0,96	0,42	0,98	0,99	0,98	1	0,75
Media	0,74	0,37	0,47	0,43	0,68	0,75	0,49	0,73	0,75	0,73	0,75	

Coeficiente de Correlación										
	bio12	bio13	bio14	bio15	bio16	bio17	bio18	bio19	Media	
bio12	1	0,99	0,17	0,78	1	0,65	1	0,71	0,79	
bio13	0,99	1	0,15	0,79	0,99	0,63	0,99	0,7	0,78	
bio14	0,17	0,15	1	0,05	0,15	0,48	0,15	0,33	0,31	
bio15	0,78	0,79	0,05	1	0,8	0,39	0,8	0,59	0,65	
bio16	1	0,99	0,15	0,8	1	0,63	1	0,71	0,79	
bio17	0,65	0,63	0,48	0,39	0,63	1	0,63	0,87	0,66	
bio18	1	0,99	0,15	0,8	1	0,63	1	0,7	0,78	
bio19	0,71	0,7	0,33	0,59	0,71	0,87	0,7	1	0,7	
Media	0,79	0,78	0,31	0,65	0,79	0,66	0,78	0,7		

Tabla N° 4 y Tabla N° 5: Valores de correlación de Pearson para las variables bioclimáticas seleccionadas. Fuente: Elaboración propia.

De este proceso se seleccionaron las variables de temperatura y precipitación que tuviesen considerables valores (HERNÁNDEZ *et al.*, 2006) ponderados de correlación ($r > 0,75$), pues en su conjunto explican mejor el comportamiento con toda la red de variables, las variables seleccionadas son: bio6, bio9, bio11, bio12, bio13, bio16 y bio18.

La metodología de componentes principales se utiliza con el propósito de identificar el grado de representatividad de pequeños grupos entre grandes grupos de datos (BETTOLI *et al.*, 2007). Este análisis se compone de diversos sub-ítems, pero resulta divisible en dos grandes grupos de análisis: factorial y componentes principales.

Se procedió a determinar el grado de representatividad del conjunto de variables entre sí mismas utilizando el análisis factorial, debido a que permite establecer la relación de los datos respecto de su varianza común³, implicando una relación directa entre los mismos datos interpolados.

El valor de relación viene dictado por las comunalidades (m) que oscilan entre 0 y 1 (0= poca confiabilidad; 1= total confiabilidad) a medida que el grado de inter-relación varía (HERNÁNDEZ *et al.*, 2006). El valor m representa la suma de los cuadrados de las correlaciones (r) de las variables, entre el conjunto de datos interpolados, su alto valor numérico querrá significar una buena representación de un componente dentro del total de datos.

Variable	Comunalidades (m)
BIO6	0,85
BIO9	0,92
BIO11	0,91
BIO12	0,94
BIO13	0,94
BIO16	0,96
BIO18	0,96

Tabla N° 6: Análisis factorial entre las variables bioclimáticas y su variación en la matriz de datos. Fuente: Elaboración propia.

Del análisis factorial se desprenden altos valores entre todos sus componentes, indicando que existe una alta confiabilidad entre las variables analizadas, re-validando la utilización de este subconjunto de datos.

³ Curso práctico. Recurso web: <http://web.ua.es/es/lpa/docencia/practicas-analisis-exploratorio-de-datos-con-spss/practica-5-analisis-multivariante-con-spss-reduccion-de-datos-analisis-de-componentes-principales-y-factorial.html>

Downscaling

Con la finalidad de reducir la resolución de píxel desde 30 a 3 arc segundos (1000 a 100 metros) se llevó a cabo la realización de un *Downscaling Estadístico* mediante el empleo de *Regresiones Lineales Múltiples* (RLM). Este procedimiento es viable para mejorar la resolución de coberturas bioclimáticas al incorporar parámetros de ajuste que relacionan más activamente la topografía con la variación en las temperaturas y las precipitaciones, que los constructos que sólo consideran valores particulares en *Regresiones Lineales Simples* (ROMERO & VINAGRE, 1985).

La ecuación matemática de RLM relaciona un valor constante (B_0) general con un conjunto de variables independientes y sus constantes (B^*x_1 ; B^*x_2 ; $B^*x_3 \dots B^*x_n$) que conforman una variable dependiente (Y_n) en torno a una ecuación de regresión que se ajusta como sigue:

$$Y_n = B_0 + B_1^*x_1 + B_2^*x_2 + B_3^*x_3 + B_n^*x_n$$

El resultado (Y_n) representa cada una de las variables bioclimáticas, habiendo una fórmula para cada variable dependiente de línea base y de cada uno de los escenarios RCP según sea el caso.

El procedimiento de determinación de las constantes de regresión se llevó a cabo mediante el Software estadístico SPSS, mediante la utilización de cinco variables independientes (X): Altitud, Latitud, Longitud, Distancia a la Línea de Costa y Distancia a la Cuenca Amazónica, que fueron procesadas mediante la metodología de pasos sucesivos (determinación de valores ponderados para cada variable de regresión, y elaboración de modelos con diversos grados de complejidad de acuerdo a la cantidad de componentes), utilizando una matriz a 30 arc segundos de resolución de aproximadamente 100.000 registros, los cuales incluyen los datos de cada una de las variables independientes y dependientes en cada punto. Las variables independientes deben ser comparables y aplicables a los escenarios de cambio climático futuro, porque debe haber un sustento comparativo que se mantenga en el tiempo. La inclusión de variables independientes (X) asociadas a la productividad vegetal como el índice NDVI o la Evapotranspiración potencial, no pueden ser consideradas para este caso.

El motivo de no realizar este procedimiento directamente en una matriz a 3 arc segundos radica en el tamaño de la información (cerca de 100.000.000 puntos), que imposibilitaría este proceso debido a limitaciones metodológicas/tecnológicas de las herramientas estadísticas y los avances tecnológicos actuales. El Downscaling se realiza directamente en la plataforma SIG, mediante la cual se relacionan las constantes de regresión obtenidas desde las grillas a 1000 metros, pero a una escala de trabajo de 100 metros.

La creación de las variables independientes (X) se llevó a cabo mediante la utilización de la plataforma SIG ArcGIS 10.2, desde la cual se calcularon en la tabla de atributos las coordenadas X e Y de cada punto, y las distancias lineales a la línea de costa y el límite de la cuenca amazónica mediante la herramienta Near. Por su parte, la altitud se obtuvo mediante un DEM SRTM re-escalado a 100 metros.

Tanto las variables de Distancia a la Línea de Costa y Distancia al Amazonas fueron sometidas a un Resample Bilinear a 100 metros, debido a que el proceso de calcular las mismas distancias en una resolución original de 100 metros habría considerado tiempos exhaustivos equivalentes a 120+ horas de procesamiento continuo para cada variable independiente. Todas las variables fueron transformadas finalmente a formato raster con la herramienta Point To Raster de ArcGIS 10.2.

“Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de Cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y Modelos de Circulación Global de muy, muy alta resolución”.

Variables Independientes (X)

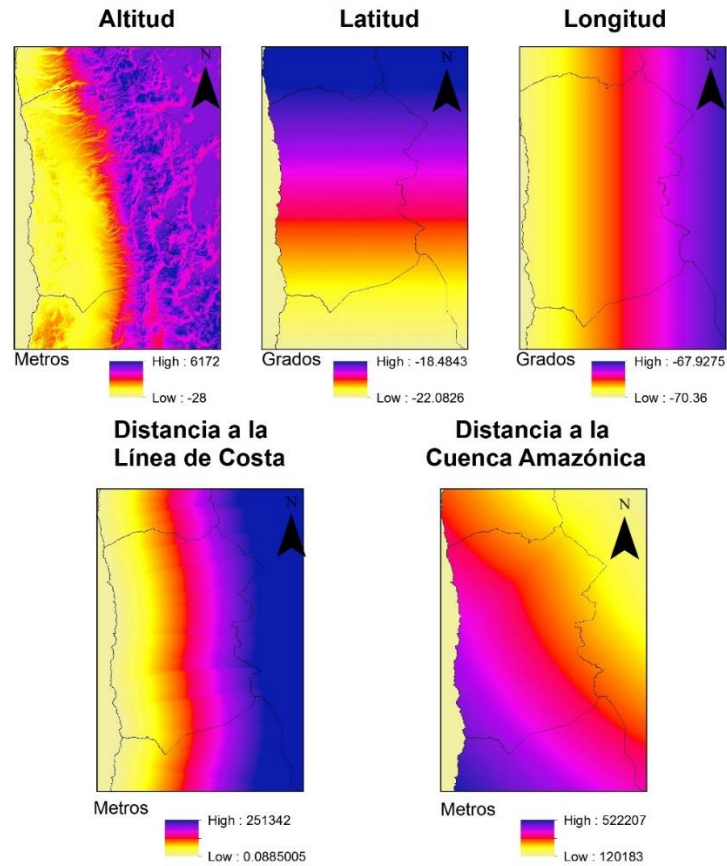


Figura N° 15: Variables independientes (X) utilizadas en el procedimiento de RLM.
Fuente: Elaboración propia.

Del resultado de las regresiones se seleccionaron los modelos que presentasen el caso más simple y, siguiendo los parámetros utilizados por SARRICOLEA (2006): en tanto que el valor de R cuadrado sea el más alto posible y el valor estadístico de F sea no mayor a 0,05, resultando los siguientes valores a continuación:

Línea base													
BIO6		BIO9		BIO11		BIO12		BIO13		BIO16		BIO18	
(Const ante)	- 528 6,82	(Const ante)	- 3395 ,30	(Const ante)	- 605 2,31	(Const ante)	- 1235 7,51	(Const ante)	- 3415 ,82	(Const ante)	- 908 6,40	(Const ante)	- 861 0,73
D. Costa	,001	Altitud	-0,05	Altitud	- 0,04	D. Costa	0,00 1859	D. Amazonas	- 0,00 0078	D. Costa	0,00 131 1	D. Costa	0,00 129
D. Amazonas	,001	D. Amazonas	0,00 0256 9	D. Amazonas	0,00 019 0	Longitud	- 171, 34	Altitud	0,00 4593	Latitud	- 21,6 1	Latitud	- 18,6 8
Altitud	-,04	Latitud	5,05	D. Costa	0,00 097 9	Altitud	0,01	D. Costa	0,00 0624	Altitud	0,01	Altitud	0,01
Latitud	24,5 5	D. Costa	0,00 0592 5	Longitud	- 87,8 2	D. Amazonas	- 0,00 0582	Longitud	- 48,9 3	Longitud	- 125, 53	Longitud	- 119, 34
Longitud	- 80,3 9	Longitud	- 51,7 3			Latitud	- 26,1 8			D. Amazonas	- 0,00 047	D. Amazonas	- 0,00 043

Tabla N° 7: Constantes de regresión de las variables bioclimáticas de la línea base.

Fuente: Elaboración propia.

“Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de Cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y Modelos de Circulación Global de muy, muy alta resolución”.

RCP 4.5													
BIO6		BIO9		BIO11		BIO12		BIO13		BIO16		BIO18	
(Const ante)	- 595 8,38	(Const ante)	- 334 8,03	(Const ante)	- 621 7,82	(Const ante)	- 618 4,23	(Const ante)	- 180 2,38	(Const ante)	- 411 3,41	(Const ante)	- 572 1,81
Altitud	- 0,04	Altitud	- 0,05	Altitud	- 0,04	D. Costa	0,00 064	D. Costa	0,00 023	D. Costa	0,00 057	D. Costa	0,00 056
Longitud	- 89,0 8	D. Amazonas	0,00 013	D. Amazonas	0,00 019	D. Amazonas	- 0,00 125	D. Amazonas	- 0,00 040	D. Amazonas	- 0,00 074	Altitud	- 0,00 206
D. Amazonas	0,00 05	D. Costa	0,00 056	D. Costa	0,00 102	Latitud	- 71,6 7	Latitud	- 22,6 3	Latitud	- 43,0 4	D. Amazonas	- 0,00 089
D. Costa	0,00 12	Longitud	- 50,5 7	Longitud	- 90,4 7	Altitud	- 0,00 481	Altitud	- 0,00 174	Longitud	- 50,1 8	Latitud	- 55,6 6
Latitud	19,8 0					Longitud	- 74,2 4	Longitud	- 21,3 3	Altitud	- 0,00 203	Longitud	- 70,3 6

Tabla N° 8: Constantes de regresión de las variables bioclimáticas del escenario RCP 4.5.

Fuente: Elaboración propia.

RCP 8.5													
BIO6		BIO9		BIO11		BIO12		BIO13		BIO16		BIO18	
(Const ante)	- 548 5,75	(Const ante)	- 324 8,13	(Const ante)	- 606 0,46	(Const ante)	- 639 0,28	(Const ante)	- 283, 85	(Const ante)	- 352 9,18	(Const ante)	- 455 3,17
Altitud	- 0,04	Altitud	- 0,04	Altitud	- 0,04	D. Costa	0,00 090	D. Costa	0,00 005	D. Costa	0,00 050	D. Costa	0,00 041
Longitud	- 83,2 3	D. Amazonas	0,00 026	D. Amazonas	0,00 019	Altitud	- 0,01	Altitud	- 0,00 404	Altitud	- 0,01	Altitud	- 0,01
D. Amazonas	0,00 05	Latitud	5,90	D. Costa	0,00 099	D. Amazonas	- 0,00 123	D. Amazonas	- 0,00 045	D. Amazonas	- 0,00 087	D. Amazonas	- 0,00 104
D. Costa	0,00 11	D. Costa	0,00 062	Longitud	- 88,4 8	Latitud	- 67,1 6	Latitud	- 22,5 3	Latitud	- 47,7 9	Latitud	- 60,8 0
Latitud	21,9 3	Longitud	- 50,2 8			Longitud	- 78,3 8			Longitud	- 41,2 3	Longitud	- 53,0 8

Tabla N° 9: Constantes de regresión de las variables bioclimáticas del escenario RCP 8.5.

Fuente: Elaboración propia.

4.5 Obtención de variables en formato raster

Se utilizó la metodología planteada por NINYEROLA *et al.* (2005) para transformar los valores de las constantes de regresión a raster. Estos valores fueron introducidos como insumo en la herramienta Raster Calculator de ArcGIS 10.2, donde se operó con las variables independientes (X) a 100 metros de resolución de píxel. Las ecuaciones de regresión se plantean a continuación:

LINEA BASE

$$\text{BIO6} = - 5286,82 \text{ constante} + (\text{Distancia Costa metros} * 0,0011) + (\text{Distancia Amazonas metros} * 0,00058) + (\text{Altitud metros} * - 0,04) + (\text{latitud grados} * 24,55) + (\text{Longitud grados} * - 80,39)$$

$$\text{BIO9} = - 3395,30 \text{ constante} + (\text{Altitud metros} * - 0,05) + (\text{Distancia Amazonas metros} * 0,00025) + (\text{latitud grados} * 5,05) + (\text{Distancia Costa metros} * 0,0005) + (\text{Longitud grados} * - 51,73)$$

$$\text{BIO11} = - 6052,31 \text{ constante} + (\text{Altitud metros} * - 0,04) + (\text{Distancia Amazonas metros} * 0,00019) + (\text{Distancia Costa metros} * 0,00097) + (\text{Longitud grados} * - 87,82)$$

$$\text{BIO12} = - 12357,51 \text{ constante} + (\text{Distancia Costa metros} * 0,0018) + (\text{Longitud grados} * - 171,34) + (\text{Altitud metros} * 0,0099) + (\text{Distancia Amazonas metros} * - 0,0005) + (\text{latitud grados} * - 26,18)$$

$$\text{BIO13} = - 3415,82 \text{ constante} + (\text{Distancia Amazonas metros} * - 0,000078) + (\text{Altitud metros} * 0,0045) + (\text{Distancia Costa metros} * 0,00062) + (\text{Longitud grados} * - 48,93)$$

$$\text{BIO16} = - 9086,40 \text{ constante} + (\text{Distancia Costa metros} * 0,0013) + (\text{latitud grados} * - 21,61) + (\text{Altitud metros} * 0,0096) + (\text{Longitud grados} * - 125,53) + (\text{Distancia Amazonas metros} * - 0,00047)$$

$$\text{BIO18} = - 8610,73 \text{ constante} + (\text{Distancia Costa metros} * 0,0012) + (\text{latitud grados} * - 18,68) + (\text{Altitud metros} * 0,0092) + (\text{Longitud grados} * - 119,34) + (\text{Distancia Amazonas metros} * - 0,00042)$$

RCP 4.5

$$\text{BIO6} = - 5958,38 \text{ constante} + (\text{Altitud metros}^* - 0,04) + (\text{Longitud grados}^* - 89,08) + (\text{Distancia Amazonas metros}^*0,000515) + (\text{Distancia Costa metros}^*0,0011) + (\text{latitud grados}^*19,80)$$

$$\text{BIO9} = - 3348,03 \text{ constante} + (\text{Altitud metros}^* - 0,05) + (\text{Distancia Amazonas metros}^*0,00013) + (\text{Distancia Costa metros}^*0,00056) + (\text{Longitud grados}^* - 50,57)$$

$$\text{BIO11} = - 6217,82 \text{ constante} + (\text{Altitud metros}^* - 0,04) + (\text{Distancia Amazonas metros}^*0,00018) + (\text{Distancia Costa metros}^*0,0010) + (\text{Longitud grados}^* - 90,47)$$

$$\text{BIO12} = - 6184,23 \text{ constante} + (\text{Distancia Costa metros}^*0,00064) + (\text{Distancia Amazonas metros}^* - 0,0012) + (\text{latitud grados}^* - 71,67) + (\text{Altitud metros}^* - 0,0048) + (\text{Longitud grados}^* - 74,24)$$

$$\text{BIO13} = - 1802,38 \text{ constante} + (\text{Distancia Costa metros}^*0,00023) + (\text{Distancia Amazonas metros}^* - 0,0004) + (\text{latitud grados}^* - 22,63) + (\text{Altitud metros}^* - 0,0017) + (\text{Longitud grados}^* - 21,33)$$

$$\text{BIO16} = - 4113,41 \text{ constante} + (\text{Distancia Costa metros}^*0,00057) + (\text{Distancia Amazonas metros}^* - 0,00074) + (\text{latitud grados}^* - 43,04) + (\text{Longitud grados}^* - 50,18) + (\text{Altitud metros}^* - 0,0020)$$

$$\text{BIO18} = - 5721,81 \text{ constante} + (\text{Distancia Costa metros}^*0,00056) + (\text{Altitud metros}^* - 0,0020) + (\text{Distancia Amazonas metros}^* - 0,00089) + (\text{latitud grados}^* - 55,66) + (\text{Longitud grados}^* - 70,36)$$

RCP 8.5

$$\text{BIO6} = - 5485,75 \text{ constante} + (\text{Altitud metros}^* - 0,04) + (\text{Longitud grados}^* - 83,23) + (\text{Distancia Amazonas metros}^* 0,00053) + (\text{Distancia Costa metros}^* 0,0011) + (\text{latitud grados}^* 21,93)$$

$$\text{BIO9} = - 3248,13 \text{ constante} + (\text{Altitud metros}^* - 0,04) + (\text{Distancia Amazonas metros}^* 0,00026) + (\text{latitud grados}^* 5,90) + (\text{Distancia Costa metros}^* 0,00062) + (\text{Longitud grados}^* - 50,28)$$

$$\text{BIO11} = - 6060,46 \text{ constante} + (\text{Altitud metros}^* - 0,04) + (\text{Distancia Amazonas metros}^* 0,00019) + (\text{Distancia Costa metros}^* 0,00093) + (\text{Longitud grados}^* - 88,48)$$

$$\text{BIO12} = - 6390,28 \text{ constante} + (\text{Distancia Costa metros}^* 0,00089) + (\text{Altitud metros}^* - 0,01) + (\text{Distancia Amazonas metros}^* - 0,0012) + (\text{latitud grados}^* - 67,16) + (\text{Longitud grados}^* - 78,38)$$

$$\text{BIO13} = - 283,85 \text{ constante} + (\text{Distancia Costa metros}^* 0,000046) + (\text{Altitud metros}^* - 0,0040) + (\text{Distancia Amazonas metros}^* - 0,00045) + (\text{latitud grados}^* - 22,53)$$

$$\text{BIO16} = - 3529,18 \text{ constante} + (\text{Distancia Costa metros}^* 0,00050) + (\text{Altitud metros}^* - 0,01) + (\text{Distancia Amazonas metros}^* - 0,00087) + (\text{latitud grados}^* - 47,79) + (\text{Longitud grados}^* - 41,23)$$

$$\text{BIO18} = - 4553,17 \text{ constante} + (\text{Distancia Costa metros}^* 0,00041) + (\text{Altitud metros}^* - 0,01) + (\text{Distancia Amazonas metros}^* - 0,0010) + (\text{latitud grados}^* - 60,80) + (\text{Longitud grados}^* - 53,08)$$

“Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de Cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y Modelos de Circulación Global de muy, muy alta resolución”.

Posteriormente, se re-calibraron las variables BIO12, BIO13, BIO16 y BIO18 mediante la herramienta CON de ArcGIS 10.2 porque estas se encontraban capturando valores negativos producto de una sub-estimación de los modelos de regresión.

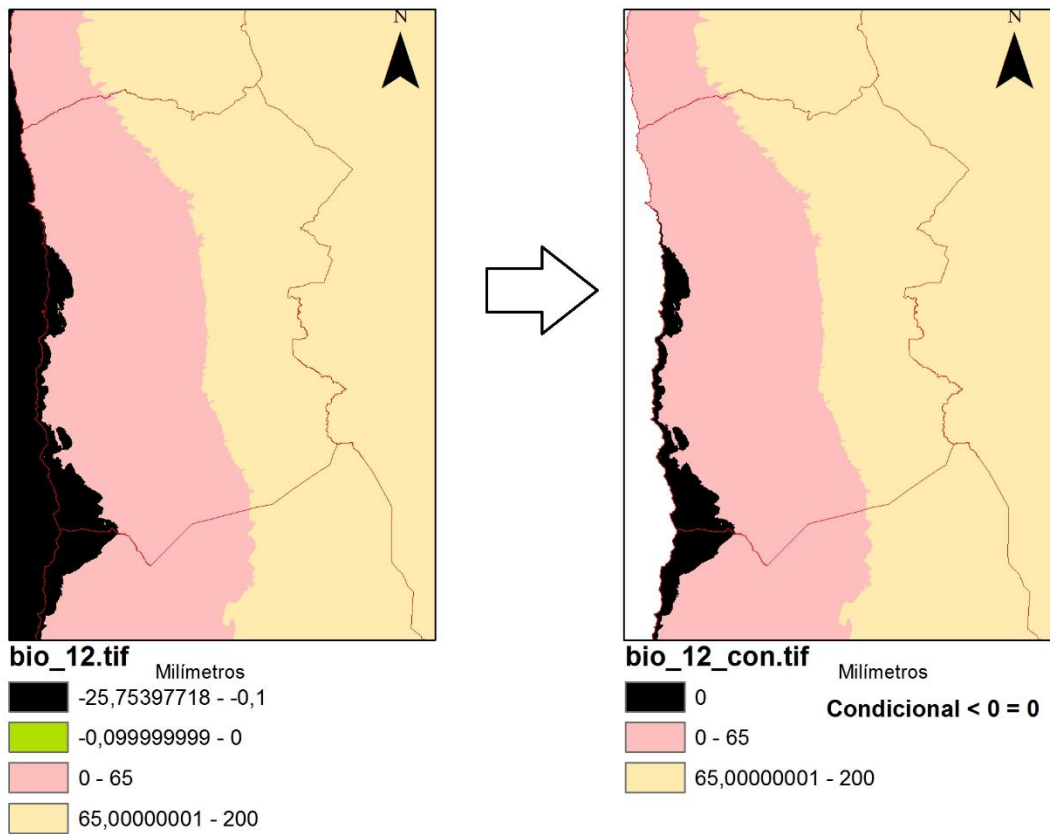


Figura N° 16: Calibración de variables bioclimáticas mediante herramienta CON. Fuente: Elaboración propia.

4.6 Obtención de residuos

Los residuos corresponden a la diferencia matemática entre los valores observados y los valores predichos y se utilizan para cuantificar las variaciones producidas por las variables independientes (NINYEROLA *et al.*, 2005).

Normalmente, se re-ensamblarían las variables bioclimáticas mediante la sumatoria de las capas residuales con las capas base, pero como se está presentando un caso de Downscaling donde las variables de origen se encuentran a una escala más gruesa, el paso descrito sólo lograría capas climáticas a resolución de 1000 metros, y no a 100 metros.

Por ello, se obtuvieron las capas residuales degradando las capas de 100 metros a 1000 metros, y restándolas con las capas iniciales de 1000 metros de la línea base de PLISCOFF *et al.* (2014) y de los ensambles de los GCM'S CSIRO_MK3_6 y HadGEM_2 respectivamente.

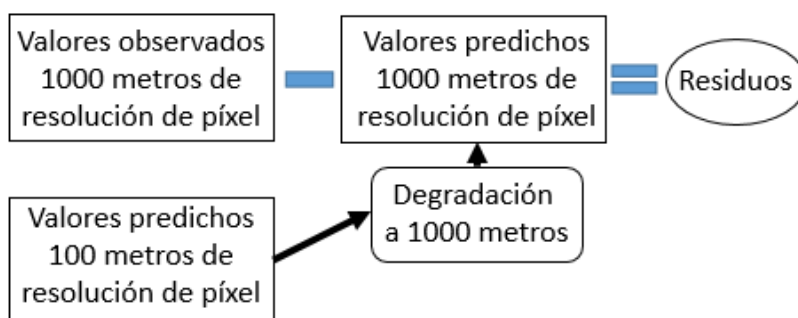


Figura N° 17: Procedimiento de obtención de residuos. Fuente: Elaboración propia.

A simple vista, las diferencias más significativas se producen en las zonas con relieves accidentados y en las zonas con amplias diferencias altimétricas como la transición entre la Precordillera y la Depresión Central. Sin embargo, las principales diferencias serán analizadas con mayor detalle en los resultados.

4.7 Modelos de distribución de especies

La preparación previa a la utilización de modelos de distribución de especie requiere de una serie de pasos sucesivos que permiten dar robustez y confiabilidad a los modelos generados, además de una constante y exhaustiva revisión de los procedimientos y las medidas de calibración finales de cada modelo.

4.7.1 Modelando la distribución de especies con MAXENT

MAXENT es un software basado en un algoritmo de aprendizaje computacional (*machine learning*) que fue desarrollado inicialmente por PHILLIPS (2004-2006) y se ha posicionado como uno de los mayores representantes de su tipo, además demostrando ser una de las herramientas individuales más robustas en la modelación actual y la proyección futura de especies y ecosistemas, (GUISAN & THULLIER, 2005; WISZ *et al.*, 2008; ZIMMERMANN, 2010; MATEO *et al.*, 2011; PLISCOFF & FUENTES, 2011; MORALES, 2012; MARQUET *et al.*, 2014; MOREIRA *et al.*, 2014; GONCALVES *et al.*, 2014; PENA-GOMEZ *et al.*, 2014; NORRIS, 2014; PROOSDIJ *et al.*, 2015).

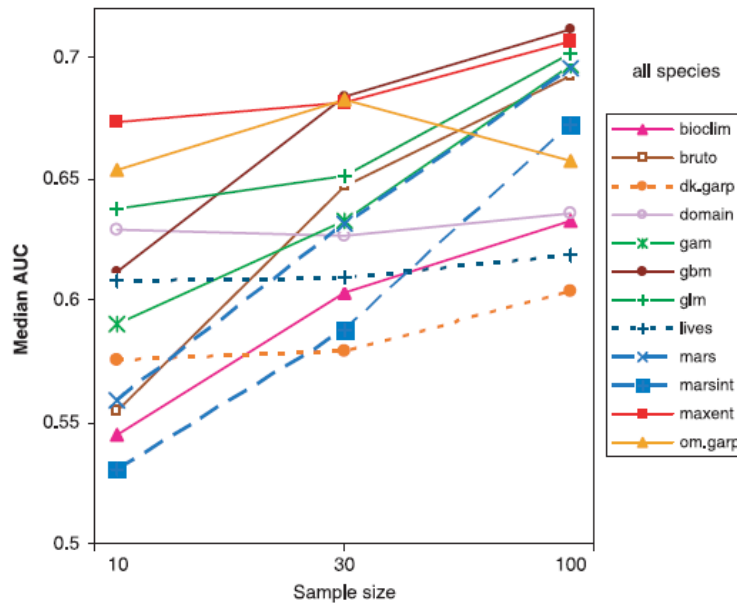


Figura N° 18: Cuadro comparativo del desempeño de MAXENT respecto de once distintos algoritmos para modelar la distribución de especies. El valor de la AUC corresponde a un elemento intrínseco de todos los modelos de distribución de especie y se utiliza para evaluar su desempeño final (siendo 1 el valor máximo posible y 0 el mínimo posible). Fuente: WISZ *et al.* (2008).

Esta potencia se le confiere a través de la utilización de un algoritmo de máxima entropía que le permite identificar las condiciones de máxima idoneidad de una especie/ecosistema respecto a patrones climáticos limitantes, más allá de la simple identificación del hábitat (GUISAN & THULLIER, 2005). Esta idea se aproximaría mucho al nicho Grinnelliano el cual se presentaría en un estado de dualidad con el nicho Hutchinsoniano, siempre y cuando se lograsen representar las condiciones inter-especie que se definen en su teoría. Sin embargo, para la presente memoria de título sólo se operará con la condición más intrínseca del nicho Grinnelliano, debido al alcance de modelar ecosistemas y sólo una especie.

Ahora, MAXENT opera como un software de caja negra, debido a que no revela la operación del algoritmo utilizado ni la forma en que cruza y relaciona las variables con los datos climáticos, no obstante no son pocos los autores que recomiendan su utilización en vista de la gran cantidad y calidad de respaldos científicos que aprueban y difunden su utilización en todo el mundo.

El software utiliza registros/puntos de presencia y la calibración de los registros se realiza automáticamente con la toma de puntos aleatorios denominados “*pseudo-ausencias*” que difieren de los puntos de ausencia absolutos, esto determina una limitación debido a que los puntos de ausencia no son realmente tales. Aun así, MAXENT se comporta muy bien sólo considerando esta fuente de datos (GORMLEY *et al.*, 2011), pudiendo desempeñarse incluso mejor que los modelos que consideren tanto presencias como ausencias (PEARSE & BOYCE, 2006; PROOSDIJ *et al.*, 2015). Además, de poseer facilidades comparativas al modelar únicamente con un tipo de fuente de registros, evitando las dificultades asociadas descritas por PEARSE & BOYCE (2006) involucradas en obtener y confiar en registros de ausencia, que se encontrarían derivando en la potencial obtención de falsos positivos.

Para la utilización de MAXENT en la presente memoria de título se prosiguió una serie de pasos para formatear la información y permitir la elaboración de los modelos bajo determinadas vías de configuración.

Estos pasos constan primariamente en transformar los registros de presencia a un formato que resulte interpretable por el programa. El formato corresponde a las tablas separadas por comas o .csv, donde los valores quedan tabulados mediante comas que separan la información como sigue:

especie,latitudo,longitudo

Donde la especie (*especie*) corresponde al nombre que se le quiere dar a la entidad modelada (puede ser el nombre de una especie como *Deyeuxia_curvula* o de una formación vegetal como *Bosque_espinoso_de...*), separada por su respectiva latitud y longitud correspondiente.

El software fue configurado para ser ejecutado siguiendo los siguientes parámetros de configuración:

Parámetros básicos	Defecto	Detalle
<i>Create response curves</i>		Se utiliza para crear curvas de respuesta de cada variable bioclimática, en torno a cada formación vegetal modelada
<i>Make pictures of predictions</i>	X	
<i>Do jackknife to measure variable importance</i>		Crea tablas que permiten entender de forma gráfica la importancia de cada variable con respecto al modelo completo.
<i>Auto features</i>	X	
Configuración básica	Defecto	Detalle
<i>Give visual warnings</i>	X	Previene al modelador sobre los posibles errores asociados a la tabulación de los datos.
<i>Show tooltips</i>	X	-
<i>Ask before overwriting</i>	X	Confirmación de sobre-escritura al procesar un modelo que ya haya sido hecho.
<i>Skip if output exist</i>	X	El programa evita el paso metodológico que el resultado ya existe.
<i>Remove duplicate presence records</i>	X	Elimina registros de presencia que se encuentren dentro de un mismo píxel, a fin de no viciar el modelo.
<i>Write clamp grid when projecting</i>	X	-
<i>Do MESS analysis when projecting</i>	X	-
<i>Random test percentage</i>		Determina el porcentaje de datos de prueba del modelo. Fijado en 20%, para no saturar el proceso ni el programa.
<i>Regularization multiplier</i>	X	-
<i>Max number of background points</i>		Corresponde a la cantidad de máximas pseudo-ausencias que se utilizarán. Fijados acorde a la cantidad de puntos de presencia de cada grupo de formaciones
<i>Replicates</i>	X	Determina la cantidad de réplicas que se harán para cada modelo. Una réplica es una repetición metodológica del modelo y se utiliza para disminuir las singularidades de cada corrida.

<i>Replicated run type</i>	X	-
<i>Test sample file</i>	X	-
Configuración avanzada	Defecto	Detalle
<i>Add samples to Background</i>	X	
<i>Add all samples to Background</i>	X	
<i>Write plot data</i>		Se utiliza para crear archivos de texto con información para crear gráficos de las curvas de respuesta en programas estadísticos como Excel.
<i>Extrapolate</i>	X	
<i>Do Clamping</i>	X	Analiza la situabilidad climática de la entidad modelada.
<i>Write output grids</i>	X	Crea las imágenes de distribución de los modelos en formato ascii
<i>Write plots</i>	X	
<i>Append Summary results to maxentResults.csv file</i>	X	
<i>Maximum iterations</i>		Define la cantidad máxima de relaciones que se darán en el modelo, un valor muy grande podría ralentizar el modelo. Se seleccionó un máximo de 1000, que permite asegurar un buen margen máximo.
<i>Convergence threshold</i>	X	
<i>Adjust sample radius</i>	X	
<i>Log file</i>	X	
<i>Default prevalence</i>	X	
<i>Apply threshold rule</i>		Maximum training sensivity plus specificty; se ajusta muy bien a los modelos que únicamente poseen puntos de presencia (LIU <i>et al.</i> , 2013 en NORRIS, 2014)
<i>Bias File</i>	X	

Tabla N° 10: Tabla de configuración de MAXENT para la realización de los modelos de formaciones y especies. Fuente: Elaboración propia.

4.7.2 Pisos vegetacionales

Los pisos vegetacionales empleados en la presente memoria de título corresponden a los propuestos por LUEBERT & PLISCOFF (2006) que corresponden a la clasificación actual vigente de ecosistemas terrestres para Chile (CONAMA, 2008b), por lo que su utilización para representar ecosistemas resulta acorde a los estándares nacionales.

Estos pisos se definen como: *“espacios caracterizados por un conjunto de comunidades vegetales zonales con estructura y fisionomía uniforme, situadas bajo condiciones mesoclimáticamente homogéneas, que ocupan una posición determinada a lo largo de un gradiente de elevación, a una escala espacio-temporal específica”* (PLISCOFF & LUEBERT, 2006). Por motivos de cohesión, la clasificación de pisos vegetacionales será acorde a ecosistemas, debido a que capturan buena parte de las condiciones descritas por LEUSCHNER (2005) previamente tratadas.

En el área de estudio se encuentran presentes un total de diecinueve pisos vegetacionales, los cuales se encuentran agrupados en torno a cinco formaciones vegetales dominantes expresados a continuación:

Piso vegetal	Formación
Bosque espinoso tropical andino de <i>Browningia candelaris</i> y <i>Corryocactus brevistylus</i>	Bosque espinoso
Bosque espinoso tropical interior de <i>Geoffroea decorticans</i> y <i>Prosopis alba</i>	
Bosque espinoso tropical interior de <i>Prosopis tamarugo</i> y <i>Tessaria absinthioides</i>	
Desierto tropical costero con vegetación escasa	Desierto absoluto
Desierto tropical interior con vegetación escasa	
Matorral bajo tropical andino de <i>Azorella compacta</i> y <i>Pycnophyllum molle</i>	Matorral bajo de altitud
Matorral bajo tropical andino de <i>Fabiana denudata</i> y <i>Chuquiraga atacamensis</i>	
Matorral bajo tropical andino de <i>Fabiana ramulosa</i> y <i>Diplostephium meyenii</i>	
Matorral bajo tropical andino de <i>Fabiana squamata</i> y <i>Festuca chrysophylla</i>	
Matorral bajo tropical andino de <i>Mulinum crassifolium</i> y <i>Urbania pappigera</i>	
Matorral bajo tropical andino de <i>Parastrephia lepidophylla</i> y <i>P. quadrangularis</i>	
Matorral bajo tropical andino de <i>Parastrephia lucida</i> y <i>Azorella compacta</i>	
Matorral bajo tropical andino de <i>Parastrephia lucida</i> y <i>Festuca orthophylla</i>	Matorral bajo desértico
Matorral bajo desértico tropical andino de <i>Atriplex imbricata</i> y <i>Acantholippia deserticola</i>	
Matorral bajo desértico tropical interior de <i>Adesmia atacamensis</i> y <i>Cistanthe salsoloides</i>	Matorral desértico
Matorral desértico tropical costero de <i>Ephedra breana</i> y <i>Eulychnia iquiquensis</i>	
Matorral desértico tropical costero de <i>Nolana adansonii</i> y <i>N. lycioides</i>	
Matorral desértico tropical interior de <i>Atriplex atacamensis</i> y <i>Tessaria absinthioides</i>	
Matorral desértico tropical interior <i>Malesherbia auristipulata</i> y <i>Tarasa rahmeri</i>	

Tabla N° 11: Pisos vegetacionales presentes en el área de estudio. Fuente: Elaboración propia en base a LUEBERT & PLISCOFF (2006).

Estos pisos se presentan como simplificaciones vegetales no uniformemente distribuidas en el territorio (unidades abstractas), entonces su área de distribución aboga más a las condiciones ambientales necesarias para su desarrollo que a su localización específica. Esto gana especial relevancia en los pisos vegetales asociados a las formaciones del Desierto absoluto, el Matorral bajo desértico y el Matorral desértico, donde se presentan extensas zonas aparentemente desprovistas de vegetación, y otras zonas específicas con parches de vegetación asociados a la incidencia de humedad dentro de un mismo piso vegetal.



Figura N° 19: Distribución de la vegetación en extensiones correspondientes a los pisos del Matorral bajo desértico y el Matorral desértico. Fuente: Elaboración propia

Los Modelos de Distribución de especie requieren la utilización de capas bioclimáticas y registros de presencia, los registros de presencia corresponden a archivos vectoriales de puntos con coordenadas de latitud y longitud. A fin de permitir la modelación de los ecosistemas, se procedió a transformar los polígonos a formato raster, y luego a formato punto mediante el empleo del SIG ArcGIS 10.2 dando como resultado un total de 187.337 puntos individuales.

Piso Vegetal	Cantidad de Pisos	Cantidad de Registros	Porcentaje del total
Pisos de la formación del bosque espinoso	3	7.837	4%
Pisos de la formación del desierto absoluto	2	63.052	34%
Pisos de la formación del matorral bajo de altitud	8	56.410	30%
Pisos de la formación del matorral bajo desértico	2	30.046	16%
Pisos de la formación del matorral desértico	4	30.032	16%
Total		187.377	

Tabla N° 12: Cantidad de registros de especies utilizados para modelar pisos vegetales.
Fuente: Elaboración propia.

4.7.3 Registros de presencias: *Deyeuxia curvula*

Los registros de especie deben considerar el mismo tipo de cuidados que los registros de presencia de los pisos vegetacionales

La diferencia más significativa entre modelar con ecosistemas y especies radica en la cantidad numérica de registros de presencia. Este tipo de consideraciones no representan reales limitaciones a los modelos, debido a que estos deben contar con mínimos (35 registros), pero no con máximos.

Fuente Datos	Cantidad registros
GBIF.org	105
Instituto de Botánica Darwinion	6
Ministerio del Medio Ambiente	52
Colecta en terreno	16
Total	179

Tabla N° 13: Fuente de datos y cantidad de registros de especies para la modelación de *D. curvula*. Fuente: Elaboración propia

La especie *D. curvula* viene definida como vegetación de tipo azonal (SAG, 2009), lo que quiere decir que sólo se desarrolla bajo condiciones específicas de humedad y salinidad propias que conjugan en los humedales Altoandinos y en algunas quebradas que conservan humedad.



Figura N° 20: Condición azonal de la especie *D. curvula*. Fuente: Elaboración propia.

Al ser vegetación azonal, se consideró la opción de utilizar la delimitación de los humedales continentales de Chile que fueron recientemente actualizados por el MMA (2014), pero se desechó la opción debido a que no existe manera de garantizar que los límites de los humedales Altoandinos se mantengan al año 2050, en especial frente a escenarios de Cambio Climático.

Es por este motivo que se busca delimitar la presencia de la especie mediante los pisos vegetacionales, debido a que algunos de estos contienen además vegetación azonal (específicamente *D. curvula*), y corresponden a: Matorral bajo tropical andino de *Parastrephia lucida* y *Azorella compacta*, Matorral bajo tropical andino de *Parastrephia lucida* y *Festuca ortophylla* y Matorral bajo tropical andino de *Parastrephia lepidophylla* y *P. quadrangularis*, todos correspondientes al Matorral bajo de altitud. Además, se incluye el piso del Matorral bajo tropical andino de *Fabiana ramulosa* y *Diplostephium meyenii* debido a que se cuantificó en terreno que existe presencia de la especie en las zonas colindantes al Salar del Huasco; la cual ha sido respaldada por estudios realizados por el proyecto Biota a cargo de SAG (FAÚNDEZ, 2005).

Para aumentar un poco más la precisión, se limitaron aún más las áreas de distribución acotando el análisis a las cuencas altiplánicas del área de estudio, las cuales contienen a los pisos vegetales ya mencionados.

Ahora bien, La modelación final de la especie se realizó con el escenario sudamericano debido a que los registros de presencia con los que se cuenta se localizan mayoritariamente en Argentina y Bolivia, sobrepasando extensamente el área propuesta por el downscaling en esta memoria de título. Estos escenarios se encuentran a una resolución de píxel de 30 arc segundos (1000 metros aproximados), y se implican pérdidas en el grado de detalle final (comparativamente con 3 arc segundos).

Las variables bioclimáticas utilizadas para modelar la especie corresponden a las empleadas por PLISCOFF *et al.* (2014), debido a que su ajuste representa de buena manera las condiciones ambientales propias asociadas a la extensión espacial de las capas bioclimáticas. Las variables corresponden a: BIO1, BIO5, BIO6, BIO12, BIO13 Y BIO14.

4.7.4 Validación y ajuste de los modelos

Los Modelos de distribución de especie requieren ser validados y ajustados para determinar si los resultados allí contenidos se ajustan o no a la realidad, o si las asunciones allí presentadas responden o no a las leyes ecológicas (GUISAN & THULLIER, 2005).

Para este caso de estudio, se procedió a validar los modelos mediante el valor numérico la curva AUC (*Area Under the Curve*) y el comportamiento general de la ROC (*Receiver Operating Characteristics*).

Se operó mediante la clasificación de SWETS (1998) recientemente aplicada en MARQUET *et al.* (2014) para clasificar ecosistemas/especies según los escenarios del cuarto informe del IPCC que presenten variaciones sobre 0,7; y que le confiere rangos de admisibilidad a los valores numéricos de la AUC según esta sea más alta.

De esta forma, y sí el modelo presenta una AUC no mayor a 0,5 querrá decir que su capacidad predictiva no resultará mejor que el azar (PHILLIPS *et al.*, 2006); si oscila entre 0,7-0,8 el modelo generado será aceptable, si es superior a 0,8 el modelo será bueno, y, si es superior a 0,9 el modelo será excelente.

“Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de Cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y Modelos de Circulación Global de muy, muy alta resolución”.

Piso	AUC	Categoría
Bosque espinoso tropical interior de <i>Prosopis tamarugo</i> y <i>Tessaria absinthioides</i>	0,913	Excelente
Bosque espinoso tropical interior de <i>Geoffroea decorticans</i> y <i>Prosopis alba</i>	0,908	Excelente
Bosque espinoso tropical andino de <i>Browningia candelaris</i> y <i>Corryocactus brevistylus</i>	0,902	Excelente
Desierto tropical interior con vegetación escasa	0,773	Aceptable
Desierto tropical costero con vegetación escasa	0,956	Excelente
Matorral bajo tropical andino de <i>Azorella compacta</i> y <i>Pycnophyllum molle</i>	0,992	Excelente
Matorral bajo tropical andino de <i>Fabiana denudata</i> y <i>Chuquiraga atacamensis</i>	0,993	Excelente
Matorral bajo tropical andino de <i>Fabiana ramulosa</i> y <i>Diplostephium meyenii</i>	0,862	Bueno
Matorral bajo tropical andino de <i>Fabiana squamata</i> y <i>Festuca chrysophylla</i>	0,968	Excelente
Matorral bajo tropical andino de <i>Mulinum crassifolium</i> y <i>Urbania pappigera</i>	0,963	Excelente
Matorral bajo tropical andino de <i>Parastrephia lepidophylla</i> y <i>P. quadrangularis</i>	0,864	Bueno
Matorral bajo tropical andino de <i>Parastrephia lucida</i> y <i>Azorella compacta</i>	0,974	Excelente
Matorral bajo tropical andino de <i>Parastrephia lucida</i> y <i>Festuca orthophylla</i>	0,985	Excelente
Matorral bajo desértico tropical andino de <i>Atriplex imbricata</i> y <i>Acantholippia deserticola</i>	0,840	Bueno
Matorral bajo desértico tropical interior de <i>Adesmia atacamensis</i> y <i>Cistanthe salsoloides</i>	0,856	Bueno
Matorral desértico tropical costero de <i>Ephedra breana</i> y <i>Eulychnia iquiquensis</i>	0,959	Excelente
Matorral desértico tropical costero de <i>Nolana adansonii</i> y <i>N. lycioides</i>	0,960	Excelente
Matorral desértico tropical interior de <i>Atriplex atacamensis</i> y <i>Tessaria absinthioides</i>	0,814	Bueno
Matorral desértico tropical interior <i>Malesherbia auristipulata</i> y <i>Tarasa rahmeri</i>	0,993	Excelente

Tabla N° 14: AUC de los modelos de ecosistemas. Fuente: Elaboración propia en base a la clasificación de SWETS (1998).

De esta forma, trece pisos se presentan con desempeños excelentes, cinco con buen desempeño y uno con un desempeño aceptable, indicando que el ajuste de los modelos responde adecuadamente a la realidad observada (modelos bioclimáticos) con ajustes muy bien delimitados.

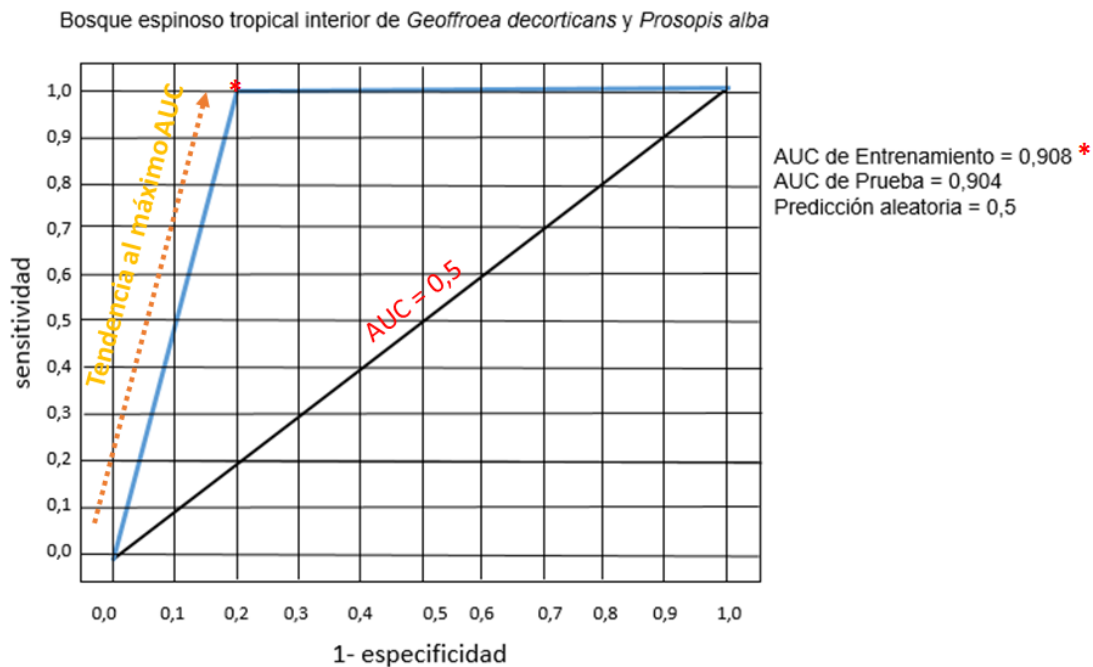


Figura N° 21: Ejemplo de curva ROC y ajuste AUC para un piso del Bosque espinoso bajo el escenario RCP 4.5 al año 2050 en el área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Además, la gran mayoría de las curvas ROC presentan un rápido acople al máximo AUC, donde se alcanza el máximo de sensibilidad a bajos valores de 1 – especificidad. Esto quiere decir que los datos representados se tornan y se mantienen muy confiables desde valores iniciales en las predicciones.

La validación de los modelos de *D. curvula* entregaron altos valores en las AUC de entrenamiento (AUC = 0,960) y un desempeño muy alto en la aproximación de la sensibilidad respecto de 1 – especificidad.

El ajuste de los modelos de pisos vegetales fue realizado mediante la herramienta Highest Position de ArcGIS 10.2, que relaciona el valor más alto de un píxel dentro de un conjunto de capas raster, superponiendo aquel que mayor significancia tenga. Este proceso se realiza píxel por píxel, y permite obtener una construcción de las zonas con predominancia de cierto piso vegetal sobre otro.

Una forma de validar si este procedimiento resulta adecuado o no está en comparar el desempeño del ensamble de los pisos de la línea base vs los pisos originalmente propuestos por LUEBERT & PLISCOFF (2006), donde, se denota un similar comportamiento en la gran mayoría de los pisos vegetacionales modelados respecto de los observados, marcando incluso conjuntos vegetales importantes como la Pampa del Tamarugal.

Por otra parte, el ajuste de los modelos de *D. curvula* resulta más complicado de realizar, debido a que no se pueden interpolar los límites de los humedales Altoandinos al año 2050, por lo que se optó por su delimitación según pisos vegetacionales y cuencas altiplánicas asociadas al territorio nacional.

5. Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos en la presente memoria de título, que serán expuestos en orden categórico según los objetivos específicos planteados.

5.1 Análisis de coberturas sometidas a procesos de downscaling

El resultado del proceso de Downscaling busca la generación de coberturas bioclimáticas a niveles de detalle más precisos que las originalmente propuestas.

Para poder analizar las diferencias entre las variables originales y las variables predichas se consta de la realización de un análisis de residuos por conjunto de variables bioclimáticas que denotan las diferencias de forma y distribución de los valores analizados.

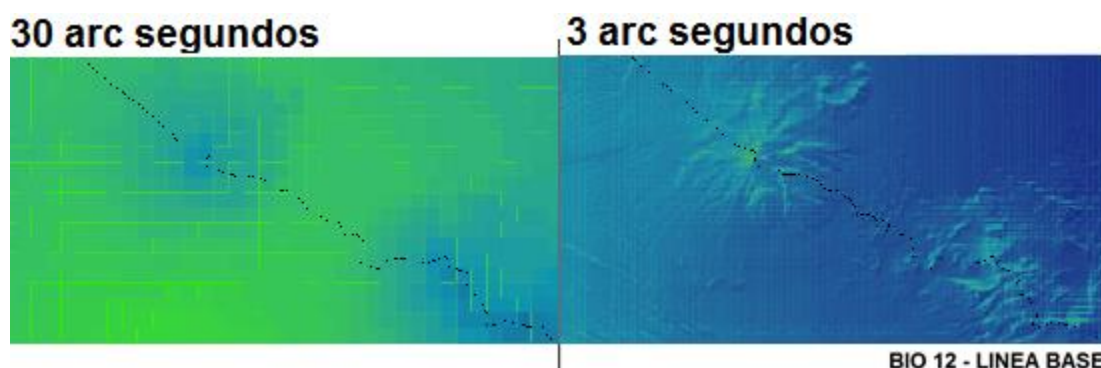


Figura N° 22: Contraste espacial entre tamaños de píxel de 30 y 3 arc segundos respectivamente en la variable BIO12 para coberturas de la línea base. Fuente: Elaboración propia.

El grado de detalle de las coberturas en un punto aleatoriamente seleccionado denota ajustes mucho más finos a la altitud, donde se diferencian umbrales y niveles más marcados, que serían imposibles de detectar a escalas más gruesas tales como ciertos fondos de quebrada cumbres de volcanes.

“Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de Cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y Modelos de Circulación Global de muy, muy alta resolución”.

LÍNEA BASE					
VARIABLE	Variable independiente				
	D. Costa	D. Amazonas	Altitud	Latitud	Longitud
BIO6	+	+	-	+	-
BIO9	+	+	-	+	-
BIO11	+	+	-	N/A	-
BIO12	+	-	+	-	-
BIO13	+	-	+	N/A	-
BIO16	+	-	+	-	-
BIO18	+	-	+	-	-
RCP 4.5					
VARIABLE	Variable independiente				
	D. Costa	D. Amazonas	Altitud	Latitud	Longitud
BIO6	+	+	-	+	-
BIO9	+	+	-	N/A	-
BIO11	+	+	-	N/A	-
BIO12	+	-	-	-	-
BIO13	+	-	-	-	-
BIO16	+	-	-	-	-
BIO18	+	-	-	-	-
RCP 8.5					
VARIABLE	Variable independiente				
	D. Costa	D. Amazonas	Altitud	Latitud	Longitud
BIO6	+	+	-	+	-
BIO9	+	+	-	+	-
BIO11	+	+	-	N/A	-
BIO12	+	-	-	-	-
BIO13	+	-	-	-	-
BIO16	+	-	-	-	-
BIO18	+	-	-	-	-

Tabla N° 15: Aportes de las variables independientes a las nuevas variables bioclimáticas post proceso de downscaling. Verde implica aumentos en la variable bioclimática y roja disminuciones. Fuente: Elaboración propia.

A la vez, las variables independientes poseen distintos grados de aporte a la construcción de las variables bioclimáticas, que varían en signo y magnitud dependiendo de si aumentan o disminuyen en cada píxel. Las relaciones de todas las variables independientes exceptuando las medidas de latitud y longitud se encuentran en metros y presentan las siguientes relaciones:

- **Distancia a la línea de costa:** esta variable refleja una variación positiva en todas las relaciones. A medida que aumenta la distancia a la línea de costa también aumentan las temperaturas y las precipitaciones, tanto en la línea base como en los escenarios RCP.

- **Distancia a la cuenca amazónica:** Un aumento de la distancia respecto de la cuenca amazónica aumentará los valores de temperatura y disminuirá las precipitaciones en todos los casos. Esto tiene mucho sentido para las precipitaciones, debido a que los vientos húmedos provenientes del Amazonas se debilitan a medida que aumenta la distancia lineal.

- **Altitud:** para todos los casos un aumento en la altitud implicará menores temperaturas (enfriamiento adiabático). Sin embargo las precipitaciones sólo aumentarían con la altitud en las variables de la línea base. Esta condición anómala de los escenarios RCP puede deberse a la configuración de incertidumbre de las variables bioclimáticas respecto a los escenarios de cambio climático.

- **Latitud:** por lo general un aumento en las latitudes tienen directa relación con las temperaturas y una relación inversa con las precipitaciones, esto tiene sentido si se relacionan las lluvias en el Altiplano andino Chileno, donde ocurre la tendencia a llover más hacia menores latitudes. Estas relaciones ocurren en todos los casos.

- **Longitud:** ocurre un comportamiento inverso respecto de la variable que determina la línea a la costa. en todos los casos el aumento de las longitudes implica disminuciones en la temperatura y precipitaciones. Es posible, que este efecto se encuentre provocando efectos adversos sobre los montos extremos en las variables de precipitación y temperatura, sobre todo en el Altiplano.

A continuación se procede a analizar los residuos obtenidos de cada variable bioclimática sometida al proceso de regresión múltiple y downscaling, según los resultados contenidos en su línea base y los escenarios RCP 4.5 y 8.5 entre ellos e individualmente.

5.1.1 Temperatura mínima del mes más frío (BIO6)

En la línea base se denota un ajuste altimétrico de las temperaturas mínimas en extensiones del Altiplano, las cuales tienden a aislar zonas más específicas con hasta 1°C más frío, y en la Precordillera, un ajuste de temperaturas en el orden de los 5°C – 0°C mucho más definido por la orografía del sector. Además, se observa una zona residual con forma de pluma que se aproxima desde la ubicación de la cuenca amazónica al centro del área de estudio que podría explicar diferencias en la cobertura climática. Las máximas temperaturas en el orden de los 4,5°C – 12°C tienden a distribuirse menos uniformemente en torno a la cordillera de la costa, logrando un matiz más constante en algunas zonas del sur de la depresión central en el área de estudio.

Las mayores diferencias residuales se localizan entre la depresión central y la Precordillera, además estas son mayores en torno al centro de la región de Tarapacá, donde ocurren diferencias de hasta 4,1°C más cálidos en las variables predichas a 3 arc segundos. Extensas zonas manifiestan diferencias significativas, que se hacen más notorias en los fondos de quebrada y en las altas cumbres del Altiplano.

En el escenario RCP 4.5 resulta posible esperar diferencias similares en torno a la relación entre las temperaturas y la orografía, especialmente en las extensiones de la Precordillera y el Altiplano. También se alcanzan temperaturas mínimas más bajas (en el orden de 2°C menos), y temperaturas algo mayores (+1°C) en extensiones de la Cordillera de la Costa y la Depresión Central. Por su parte los residuos tienden a mantener la misma lógica que los observados en la línea base, sólo que ya no existe una posible conexión (de tipo pluma) tan poderosa con la cuenca amazónica como la vista en el escenario base.

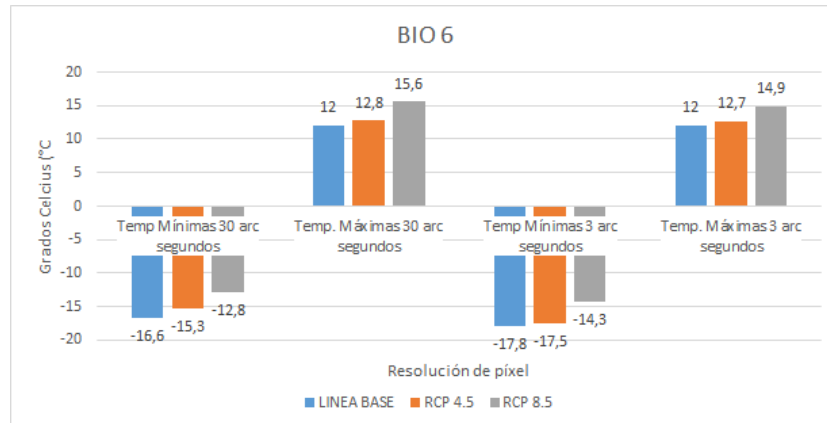


Figura N° 23: Cambios en la variable BIO6 entre resoluciones de píxel de 30 y 3 arc segundos respectivamente para la línea base y los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 al 2050 según el ensamble de modelos GCM CSIRO_Mk_3_6 y HaDGEM_2. Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento de la variable predicha en el escenario RCP 8.5 se manifiesta acorde con las observaciones manifestadas en el escenario anterior y la línea base, manteniendo en línea el comportamiento propio del escenario pesimista. Las temperaturas mínimas son más agresivas (2°C menores) y se extienden fuera de los límites del área de estudio de manera más uniforme en el Altiplano Boliviano.

A diferencia del escenario RCP 4.5 y la línea base, el escenario RCP 8.5 tiende a presentar una distribución más uniforme en el rango de temperaturas sobre los 4,5°C, acaparando la totalidad de la Cordillera de la Costa y la Depresión Central en el área de estudio. Los residuos por su parte denotan una influencia algo mayor de la vertiente amazónica en la configuración de las temperaturas mínimas respecto del escenario RCP 4.5 pero, que no resulta tan dominante como la conexión vista en la línea base.

5.1.2 Temperatura media del trimestre más seco (BIO9)

En esta variable ocurren significativos cambios respecto de las mínimas temperaturas, donde se denota una fuerte influencia desde la orografía del sector, logrando diferencias de hasta -4°C en algunas zonas del Altiplano para la línea base.

Por otra parte la zona costera de la región presenta amplias diferencias también, con temperaturas que son hasta 4°C mayores (especialmente al sur de Iquique) respecto de la cobertura original de la línea base, y una mejor definición del límite de las quebradas que limitan con el límite regional norte.

En el escenario RCP 4.5 la representación gráfica de una mayor predominancia de las bajas temperaturas medias en la gran mayoría del Altiplano del área de estudio ligada a las cadenas montañosas de la cordillera occidental y el inicio de la cordillera de Domeyko, se contraponen con el nodo de residuos de altas variaciones positivas al sur de Iquique, donde las temperaturas medias máximas resultan ser hasta 3°C mayores en las variables predichas respecto de las de base. De esta forma el dominio de las temperaturas en esta variable también se presenta con una importante influencia de la orografía, que logra generar una distribución más uniforme de las temperaturas en la región.

En el caso del escenario RCP 8.5 existe un comportamiento completamente distinto de la variable respecto de los dos casos anteriores. Existen moderados – altos valores de anomalías con hasta 4°C de diferencia en la gran mayoría del área de estudio. La única zona que se manifiesta con menores variaciones corresponde a Parte de la Depresión Central donde se ubica actualmente la Pampa del Tamarugal.

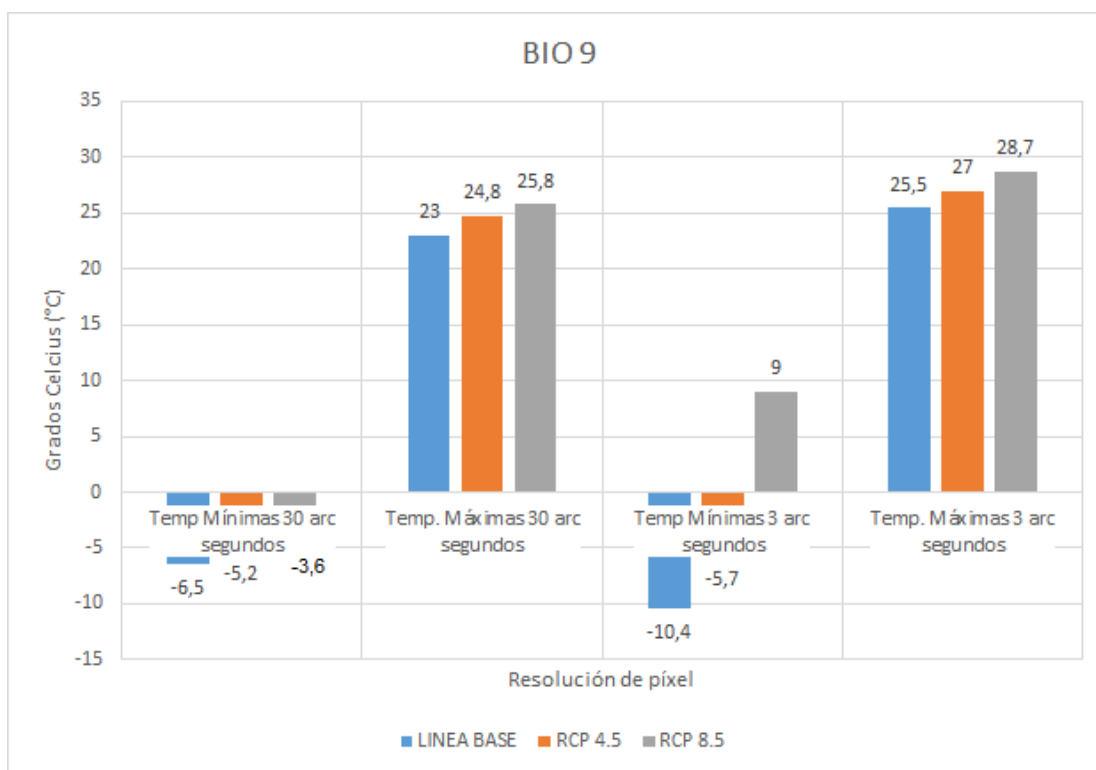


Figura N° 24: Cambios en la variable BIO9 entre resoluciones de píxel de 30 y 3 arc segundos respectivamente para la línea base y los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 al 2050 según el ensamble de modelos GCM CSIRO_Mk_3_6 y HaDGEM_2. Fuente: Elaboración propia.

En el Altiplano las temperaturas medias tienden a comportarse mucho más cálidas, con temperaturas mínimas de casi 1°C (versus -3,6°C en el escenario RCP base) y con tendencias más marcadas al intervalo de 5 – 11,5°C (desapareciendo la mayoría de las zonas con 0°C – 5°C). El comportamiento de los residuos en la zona costera permite obtener diferencias no cuantificadas en los rangos de distribución, que le permitirían a la zona alcanzar temperaturas medias de hasta 28,7°C durante el trimestre más seco.

5.1.3 Temperatura media del trimestre más frío (BIO11)

La configuración de esta variable muestra grandes diferencias entre los valores originales y los valores predichos, pasando de temperaturas mínimas de $-7,1^{\circ}\text{C}$ a $3,4^{\circ}\text{C}$, que además se encuentran ahora restringidas a las altas cumbres de la cordillera occidental y el Altiplano que proyectan condiciones de mínimas temperaturas medias muchísimo más cálidas que las propuestas en la línea base, que se manifiestan mucho menos continuas que las originalmente presentadas. Además, se configuran las medias máximas para el trimestre más frío, en el orden de $17,5^{\circ}\text{C}$ – 25°C y que resultan en hasta $6,6^{\circ}\text{C}$ más cálidos en las zonas costeras del área de estudio, significando en importantes diferencias que posiblemente vengan asociadas a la distancia a la costa y la orografía y configurando la nueva variable en torno a extremos mínimos más suaves y máximos más severos.

Los residuos en esta variable muestran diferencias significativas respecto de las de la línea base, los mínimos son mayores y los máximos son menores. Por ende, se espera que las condiciones predichas en el Altiplano, la Cordillera Occidental y la Precordillera sean más extremas que las vistas en la línea base (acorde al escenario RCP 4.5).

El ajuste en la variable predicha presenta temperaturas algo más cálidas, con diferencias de $0,2^{\circ}\text{C}$ respecto del escenario RCP 4.5 original. Sin embargo, la relación de temperatura con las altas cumbres tiende a mantenerse inalterada, marcando una diferencia respecto de la ordenación de las temperaturas en la línea base.

A diferencia de los otros casos ya vistos, se aprecian menores temperaturas medias al sur de la Pampa del Tamarugal que oscilan en hasta $3,6^{\circ}\text{C}$ menos, y que marcan importantes diferencias para esta zona; sin embargo, se mantiene la tendencia de representar mayores temperaturas en la costa cercana a Iquique la cual sería hasta 3°C más cálida durante el trimestre más frío del año.

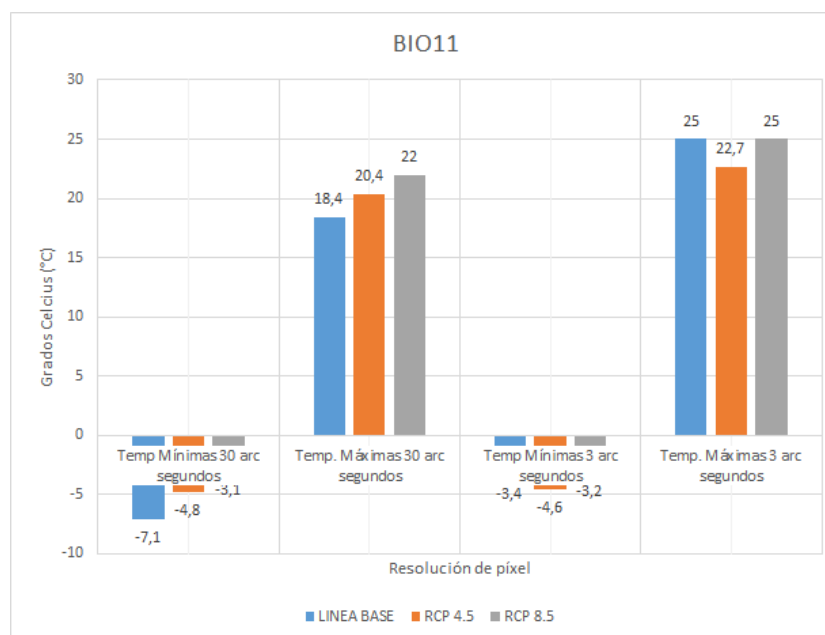


Figura N° 25: Cambios en la variable BIO11 entre resoluciones de píxel de 30 y 3 arc segundos respectivamente para la línea base y los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 al 2050 según el ensamble de modelos GCM CSIRO_Mk_3_6 y HaDGEM_2. Fuente: Elaboración propia.

La nueva configuración para la variable BIO11 en el escenario RCP 8.5 propone temperaturas mínimas hasta 1°C más frías en algunas zonas del Altiplano y la Cordillera Occidental, que se encuentran asociadas a las zonas de altas cumbres. El resto del altiplano se presenta menos cálido, con temperaturas medias entre 1,5°C – 5,5°C que ocupan porciones más extensas que las manifestadas en el escenario RCP 8.5 original.

Al igual que con la variable RCP 4.5 se muestran mayores temperaturas en las áreas costeras cercanas a Iquique, las cuales se extienden por buena parte de la Pampa del Tamarugal y el sur de la Cordillera de la Costa en el área de estudio. Las menores diferencias ocurren el torno al centro-norte de la Depresión Central y la Precordillera, donde los residuos implican variaciones entre -1,5°C y 2°C.

5.1.4 Precipitación anual (BIO12)

La reorganización de las precipitaciones resulta mucho más drástica que en las temperaturas, donde se re-estructuran los valores en “franjas” que van en sentido este – oeste y que marcan una marcada tenencia a distribuir las precipitaciones mucho más homogéneamente en el área de estudio que en la línea base original. Los residuos muestran la misma tendencia, y representan plumas del orden de 40 a 85 mm que se encontrarían en zonas de la Depresión Central y parte de la Precordillera.

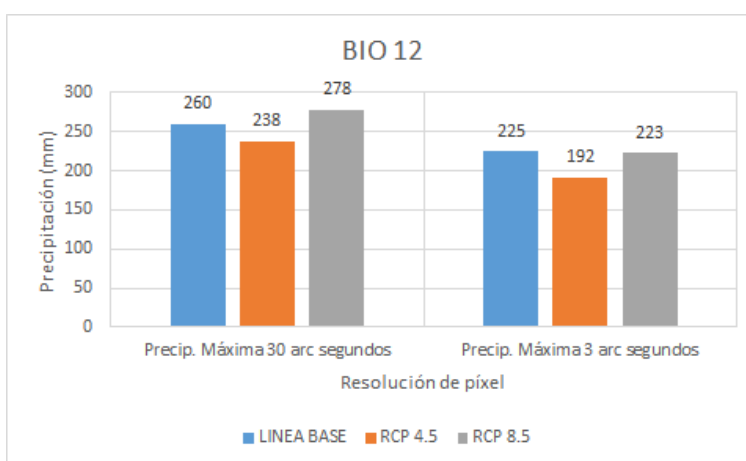


Figura N° 26: Cambios en la variable BIO12 entre resoluciones de píxel de 30 y 3 arc segundos respectivamente para la línea base y los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 al 2050 según el ensamble de modelos GCM CSIRO_Mk_3_6 y HaDGEM_2. Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la línea base, el ordenamiento de las precipitaciones en la predicción a 3 arc segundos tiende a tener un comportamiento más homogéneo en toda el área de estudio, este tipo de condiciones estarían ocurriendo medio grado más al oeste que lo previsto en el escenario RCP 4.5 llegando a presentar eventos de precipitación en algunas zonas del Desierto de Atacama (Depresión Central) para el año 2050 al escenario RCP 4.5.

También se presenta una re-estructura de los datos, provocando una extensión de las precipitaciones altiplánicas hacia la Precordillera, con valores que oscilarían entre los 50mm – 130mm anuales en algunas zonas, y que podrían alcanzar algunas localidades como los poblados de Pica y Camiña.

En el caso propuesto al escenario RCP 8.5 al año 2050 se estarían observando precipitaciones con pequeñas variaciones respecto del escenario RCP 4.5 que se encontrarían localizadas en el norte de la región dentro del actual Parque Nacional Isluga, con aumentos en las precipitaciones de hasta 64mm anuales. Además, se estarían presentando condiciones algo más secas en la zona costera al norte de Iquique, con una “pluma” que extendería las tendencias hacia la Depresión Central entre los 19°-20° S y los 70° W.

Comparativamente, la predicción del nuevo escenario RCP 8.5 seguiría la lógica ya manifestada en el escenario RCP 4.5 y la línea base al distribuir las precipitaciones en franjas más homogéneas en la región, que contribuirían a reducir las zonas de extrema aridez, específicamente al sur de los 20° S.

5.1.5 Precipitación del mes más húmedo (BIO13)

Las precipitaciones para el mes más húmedo seguirán la misma tendencia que las otras variables de precipitación al re-distribuirse en torno a franjas en sentido longitudinal, pero con residuos orientados a reducir y aumentar mucho las precipitaciones en los extremos norte (hasta 61mm menos) y sur (hasta 30mm más) del área de estudio respectivamente.

En el caso del escenario RCP 4.5 ocurren reducciones de hasta 17mm en algunas zonas predichas, las cuales se encuentran demarcadas en la cartografía de residuos hacia el extremo derecho del área interpolada (por fuera del área de estudio). A diferencia de la configuración de los residuos de la línea base, el escenario RCP 4.5 propuesto manifiesta una pluma mucho más definida de perturbaciones, que posiblemente se encuentre asociada a la incidencia latitudinal y los indicadores de continentalidad (distancias al amazonas y la costa), que además se encontrarían aumentando el área de menores precipitaciones respecto de la variable BIO12 en cerca de 20km.

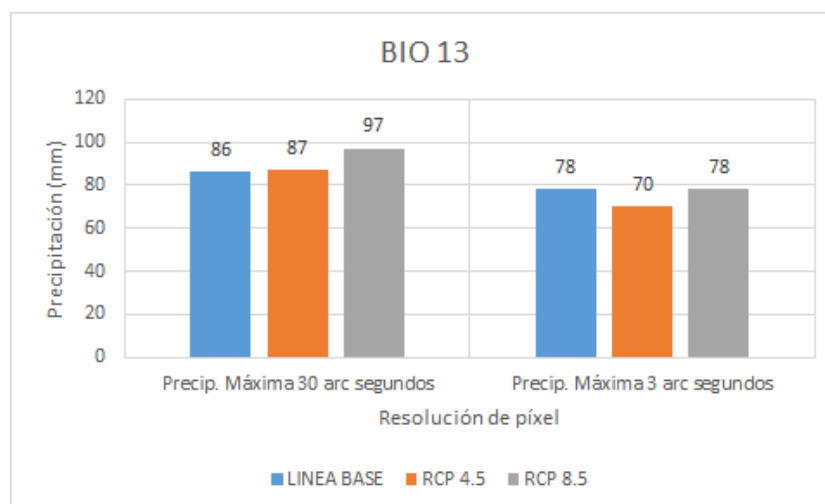


Figura N° 27: Cambios en la variable BIO13 entre resoluciones de píxel de 30 y 3 arc segundos respectivamente para la línea base y los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 al 2050 según el ensamble de modelos GCM CSIRO_Mk_3_6 y HaDGEM_2. Fuente: Elaboración propia.

El escenario RCP 8.5 manifiesta similares condiciones que el escenario RCP 4.5. No obstante es mucho mayor el área residual que incide en el aumento de las precipitaciones para el área de estudio. De hecho, el escenario RCP 4.5 es el único que supone reducciones en las precipitaciones durante el mes más húmedo, ya que el escenario RCP 8.5 tiende a mantener los niveles máximos de la línea base, solo que con mayor masividad espacial.

Además la pluma residual tanto en el escenario RCP 4.5 y RCP 8.5 tiende a ser más masiva, sin embargo, aisladamente menos agresiva que el nodo observado en la línea base, ya que solo plantea oscilaciones en el orden de los 5-16mm (en vez de 15-30mm). En otras palabras, se espera que los escenarios RCP presenten casos más masivos, con precipitaciones que se extiendan más ampliamente en el territorio que en los casos previstos por los escenarios GCM y la línea base.

5.1.6 Precipitación del trimestre más húmedo (BIO16)

La re-estructuración de las precipitaciones durante el trimestre más húmedo se encontraría siguiendo la tendencia de todas las variables de precipitación ya analizadas, al re-ordenar los valores en torno a franjas longitudinales poco acordes a las macro estructuras orográficas.

Sin embargo, se dan leves diferencias en esta cobertura: entre los 20°S - 21°S se alcanzan valores de hasta 80mm que conformarían una protuberancia que se encontraría expandiendo a un área más específica la incidencia de las lluvias Altiplánicas procedentes del Monzón Sudamericano. Además estarían precipitando hasta 46mm menos en algunas zonas, principalmente al norte del área de estudio cerca del límite regional de la región de Arica y Parinacota; y claramente, precipitaría menos en las extensiones del Altiplano Chileno presente en la Región.

En el caso del escenario RCP 4.5 las precipitaciones también serían menores. Sin embargo, estas tendrían un comportamiento extremo en torno a los límites del área de estudio, pudiendo quizás atribuirse dichas medidas al denominado efecto de borde previamente discutido.

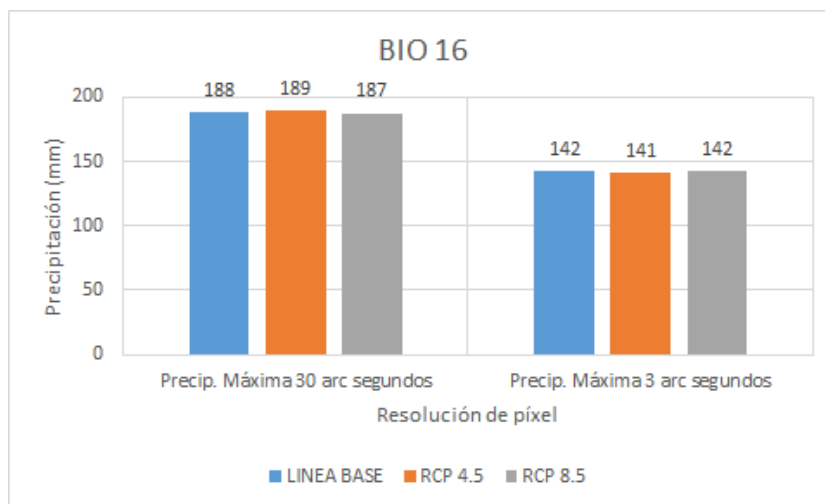


Figura N° 28: Cambios en la variable BIO16 entre resoluciones de píxel de 30 y 3 arc segundos respectivamente para la línea base y los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 al 2050 según el ensamble de modelos GCM CSIRO_Mk_3_6 y HaDGEM_2. Fuente: Elaboración propia.

La medida de longitudinalización de las precipitaciones sería menos severa en esta variable, debido a que la variable original también presentaría esta ordenación de manera natural.

Ya sería el escenario RCP 8.5 el que presentase un comportamiento espacial más similar a la línea base que el escenario RCP 4.5, mediante la existencia de la misma protuberancia ya descrita con anterioridad. El detalle de los residuos refleja la existencia de una pluma que se encontraría conectando las precipitaciones a una vertiente orográfica, que explicaría el plegamiento más ajustado de las precipitaciones a los límites físicos entre Depresión Central, Precordillera y Cordillera Occidental.

De hecho de la totalidad de las variables ya vistas, esta es la única que presenta un ajuste mucho más notorio a la variable altitudinal, posiblemente debido a una mayor ponderación de la variable de altitud en la fórmula de regresión.

5.1.7 Precipitación del trimestre más cálido (BIO18)

De la última variable generada para la línea base que capta las precipitaciones durante el trimestre más cálido, ocurren importantes valores residuales que son mayoritariamente asociados a un fuerte frente de precipitaciones que se encontraría presente en buena parte del área de estudio al sur de los 20°S, entre los 70°W y los 69°W. Estas precipitaciones significarían importantes aumentos respecto de la variable original, implicando la caída de hasta 57mm en zonas que antes se consideraban con no más de 10mm.

Además, se tienden a reducir las precipitaciones en el Altiplano, ya que el área abarcada en el rango de 65mm – 110mm sería mucho menor que en la variable predictora. Al igual que con la variable bioclimática anterior (BIO16) existen residuos anormalmente altos asociados a los extremos del área analizada, que podría deberse a un efecto de ruido causado por los bordes de la simulación.

El escenario RCP 4.5 presenta altos residuos respecto de la capa original propuesta de la combinación de los GCM'S CSIRO_Mk_3_6 y HadGEM_2, que se concentran en torno a la depresión central y la vertiente más septentrional del Altiplano en el área de estudio, en tanto, los valores observados cercanos al borde sur meridional pueden deberse a ruidos asociados de los bordes. La ordenación de las precipitaciones en franjas longitudinales supone nuevas zonas con bajas precipitaciones al norte de los 20°S, que se encontrarían invirtiendo la tendencia de las variables de precipitación ya observadas.

Ya con los residuos del escenario RCP 8.5 se presentan amplias disminuciones en las precipitaciones máximas asociadas a zonas fuera del área de estudio. De hecho, en el área

de estudio misma, existen valores que son mucho mayores que los incorporados en la variable predictora, observándose zonas características (también presentes en casi todas las variables de precipitación) que se encontrarían precipitando mucho más que antes.

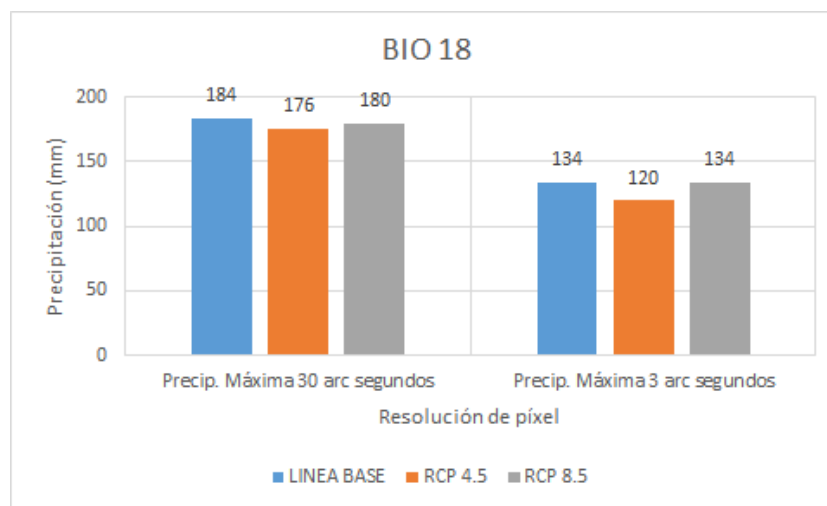


Figura N° 29: Cambios en la variable BIO18 entre resoluciones de píxel de 30 y 3 arc segundos respectivamente para la línea base y los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 al 2050 según el ensamble de modelos GCM CSIRO_Mk_3_6 y HaDGEM_2. Fuente: Elaboración propia.

A diferencia del escenario RCP 4.5, en el escenario RCP 8.5 no se presenta la zona previamente descrita en que se reducían las precipitaciones (al norte de los 20°S). En vez de eso, existe otra zona de cobertura media que oscila entre valores de 10mm-35mm (estimado 20mm según residual). Además bajo esta configuración se producirían precipitaciones más abundantes en torno al Altiplano septentrional del área de estudio, en las inmediaciones del Parque Nacional Isluga.

Los escenarios de cambio climático a menudo suponen cambios en la ordenación e intensidad de las precipitaciones y temperaturas que, en el caso de los actuales escenarios tendrían una tendencia a re-distribuir y aumentar levemente las precipitaciones en las zonas altas del altiplano (respecto de los escenarios a 30 arc segundos), reduciendo las precipitaciones generales en el resto de este. Y a aumentar de igual forma las temperaturas máximas y disminuir dramáticamente las mínimas.

De esta forma, las variables presentadas se enfocan mayoritariamente en mantener –de cierta manera- las tendencias observadas, con matices que re-ordenan patrones en torno a lograr distribuciones más homogéneas en el área de estudio.

El reajuste de las temperaturas a las altitudes se manifiesta mucho más en las variables a 3 arc segundos, haciéndose muchísimo más dominante la relación de pérdida de temperaturas a medida que la altitud disminuye, marcando leves diferencias en la mayoría de las zonas interpoladas.

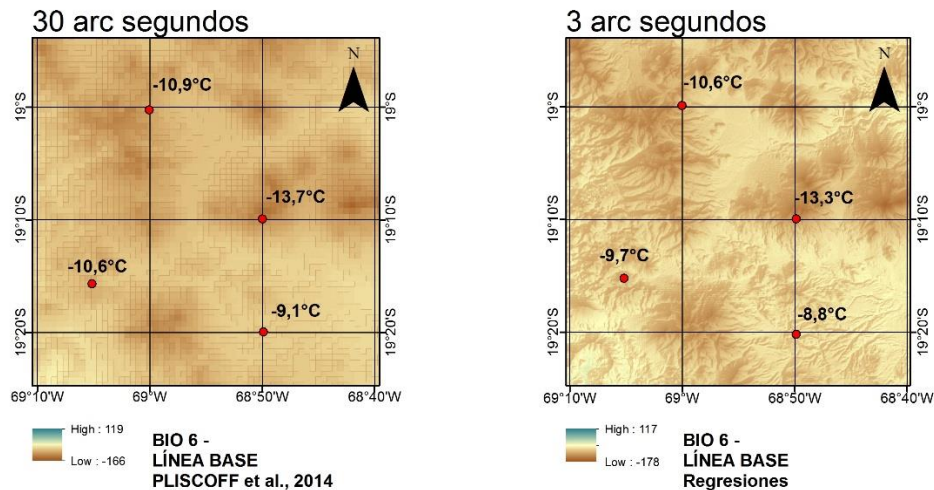


Figura N° 30: Detalle de una variable de temperatura (BIO6). Fuente: Elaboración propia.

De la tabla de ajustes de mínimos/máximos se respalda en cierta medida lo planteado. Casi todos los valores extremos se mantienen con bajas variaciones, exceptuando a las variables BIO9 y BIO11 que presentan altas oscilaciones referidas a condiciones menos frías durante el trimestre más seco y el trimestre más frío, posiblemente asociadas a ajustes a la orografía regional, que podrían tender a forzar los valores extremos.

Las precipitaciones tienden a re-distribuirse homogéneamente en franjas que podrían no estar de todo correctas con la realidad observada, y que podrían sobre-estimar escenarios futuros.

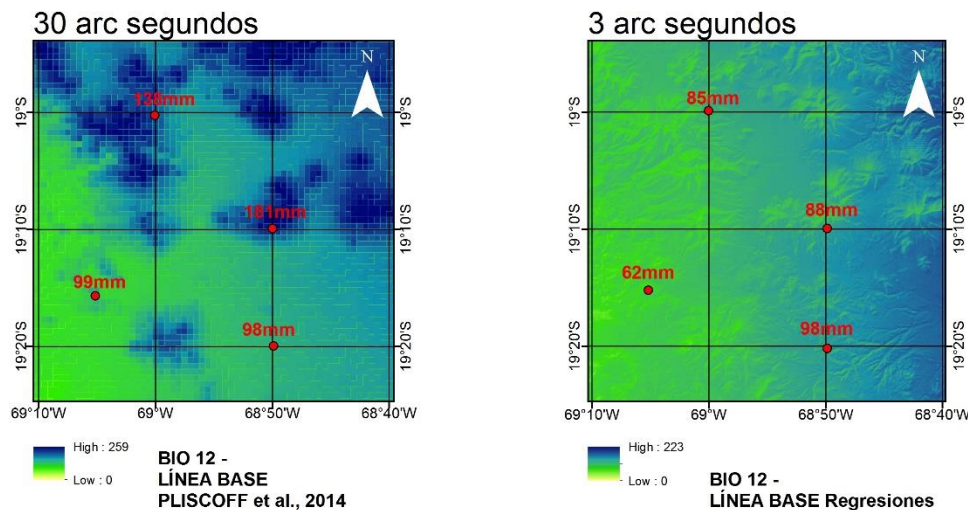


Figura N° 31: Detalle de una variable de precipitación (BIO12). Fuente: Elaboración propia.

No obstante, sí se acentúa el detalle y se evalúa el desempeño de las capas de precipitación a escala de píxel, probablemente se determinen mayores precisiones asociadas a la orografía que podrían mejorar significativamente las condiciones previas (30 arc segundos).

Además, es necesario considerar que el proceso de Downscaling significó en la supuesta pérdida del corredor de bajas precipitaciones que se observa en las variables a 30 arc segundos asociadas a la incidencia del GCM CSIRO_mk_3_6. Esta pérdida resulta de una re-calibración y reordenación producto de las variables independientes en la ecuación de regresión.

BIO6	L.BASE	MIN	7,23%	BIO9	L.BASE	MIN	60,00%	BIO11	L.BASE	MIN	-52,11%
		MAX	0%			MAX	10,87%			MAX	35,87%
	RCP 4.5	MIN	14,38%		RCP 4.5	MIN	9,62%		RCP 4.5	MIN	4,17%
		MAX	-0,78%			MAX	8,87%			MAX	20,40%
	RCP 8.5	MIN	-11,72%		RCP 8.5	MIN	350,00%		RCP 8.5	MIN	-3,13%
		MAX	-4,49%			MAX	11,24%			MAX	13,64%
BIO12	L.BASE	MAX	-13,46%	BIO13	L.BASE	MAX	-24,47%	BIO16	L.BASE	MAX	-9,30%
	RCP 4.5	MAX	-24,96%		RCP 4.5	MAX	-25,40%		RCP 4.5	MAX	-19,54%
	RCP 8.5	MAX	-19,78%		RCP 8.5	MAX	-24,06%		RCP 8.5	MAX	-19,59%
BIO18	L.BASE	MAX	-27,17%								
	RCP 4.5	MAX	-31,82%								
	RCP 8.5	MAX	-25,56%								

Tabla N° 16: Variación porcentual respecto de la línea base y los escenarios RCP 4.5 y 8.5 para las variables bioclimáticas de temperatura y precipitación. Fuente: Elaboración Propia.

Respecto de la tabla de valores extremos se denotan variaciones negativas en el orden de -13,4% a -31,82% en todas las variables predichas, implicando importantes reducciones en todos los casos. También la tendencia de los mínimos/máximos presentadas en los escenarios a 1km (30 arc segundos) se mantiene en gran parte de los casos.

Las excepciones ocurren en:

- BIO12: escenario RCP 8.5 invierte su comportamiento, generando menores precipitaciones -2mm- respecto de la línea base.
- BIO13: escenario RCP 8.5 no aumenta sus máximos y se mantiene igual que la línea base.
- BIO16: ambos escenarios RCP no mantienen la tendencia. El escenario RCP 4.5 disminuye 1mm en vez de aumentar, y el escenario RCP 8.5 no disminuye. No obstante, las variaciones son del orden de 1mm, así que su comportamiento puede ser marginal.
- BIO18: escenario RCP 8.5 no presenta disminuciones respecto de la línea base. No obstante estas ocurren en el orden de 4mm, siendo su no demasiado significativo.

Es importante no perder el foco con las variables predictoras que fueron utilizadas para reconstruir estas variables. Posiblemente un nuevo set requiera variables independientes adicionales, o un acercamiento estadístico distinto, como SPLINES, que podrían inclinar las representaciones a obtener resultados más similares con las variables originales (a 30 arc segundos).

5.2 Análisis de cambio de ecosistemas vegetales

Como es de esperarse, un cambio en las condiciones bioclimáticas lleva de por sí un cambio en la distribución y concentración de las especies vegetales que allí se desarrollen, afectando en mayor o menor medida a las comunidades bióticas que existan.

5.2.1 Ajuste de los modelos de línea base a los pisos vegetales

Otra forma de corroborar la integridad de las variables bioclimáticas generadas es mediante la comparación de los modelos de distribución de especie de los pisos vegetacionales. Si la modelación de la línea base coincide con la propuesta original de pisos, se estaría dando a entender que el reajuste de las variables bioclimáticas no se encontrarían modificando seriamente las condiciones de habitabilidad de las especies, y su utilización no necesariamente afectaría negativamente a los modelos.

“Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de Cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y Modelos de Circulación Global de muy, muy alta resolución”.

	Área L. Base Pisos Original	Área L. Base Regresion es
Bosque espinoso tropical andino de <i>Browningia candelaris</i> y <i>Corryocactus brevistylus</i>	2%	2%
Bosque espinoso tropical interior de <i>Geoffroea decorticans</i> y <i>Prosopis alba</i>	1%	1%
Bosque espinoso tropical interior de <i>Prosopis tamarugo</i> y <i>Tessaria absinthioides</i>	1%	2%
Desierto tropical costero con vegetación escasa	4%	3%
Desierto tropical interior con vegetación escasa	40%	37%
Matorral bajo desértico tropical andino de <i>Atriplex imbricata</i> y <i>Acantholippia deserticola</i>	6%	5%
Matorral bajo desértico tropical interior de <i>Adesmia atacamensis</i> y <i>Cistanthe salsoloides</i>	5%	5%
Matorral bajo tropical andino de <i>Azorella compacta</i> y <i>Pycnophyllum molle</i>	1%	1%
Matorral bajo tropical andino de <i>Fabiana denudata</i> y <i>Chuquiraga atacamensis</i>	0%	0%
Matorral bajo tropical andino de <i>Fabiana ramulosa</i> y <i>Diplostephium meyenii</i>	12%	11%
Matorral bajo tropical andino de <i>Fabiana squamata</i> y <i>Festuca chrysophylla</i>	2%	2%
Matorral bajo tropical andino de <i>Mulinum crassifolium</i> y <i>Urbania pappigera</i>	3%	3%
Matorral bajo tropical andino de <i>Parastrephia lepidophylla</i> y <i>P. quadrangularis</i>	11%	12%
Matorral bajo tropical andino de <i>Parastrephia lucida</i> y <i>Azorella compacta</i>	2%	2%
Matorral bajo tropical andino de <i>Parastrephia lucida</i> y <i>Festuca orthophylla</i>	1%	2%
Matorral desértico tropical costero de <i>Ephedra breana</i> y <i>Eulychnia iquiquensis</i>	1%	3%
Matorral desértico tropical costero de <i>Nolana adansonii</i> y <i>N. lycioides</i>	1%	1%
Matorral desértico tropical interior de <i>Atriplex atacamensis</i> y <i>Tessaria absinthioides</i>	8%	8%
Matorral desértico tropical interior <i>Malesherbia auristipulata</i> y <i>Tarasa rahmeri</i>	0,09%	0,38%
Total	100%	100%

Tabla N° 17: Tabla comparativa de extensión de las formaciones vegetales entre la modelación mediante regresiones y la propuesta de LUEBERT & PLISCOFF (2006).

Fuente: Elaboración propia.

Según lo observado, existirían once pisos que presentan ajustes muy buenos entre la propuesta del modelo de regresiones y la propuesta original de pisos. A su vez, cuatro pisos presentan aumentos leves y cuatro pisos presentan disminuciones leves.

Otra capacidad de ajuste, se da al comparar el comportamiento espacial de los pisos, estos por lo general tienden a mantener las dimensiones espaciales propuestas, presentando sólo pequeñas variaciones aisladas (véase anexo N°22).

Estos resultados fueron ensamblados mediante la herramienta Highest Position de ArcGIS 10.2, que relaciona el raster dominante para cada píxel dentro de un conjunto de rasters. Por ende, la distribución de los pisos corresponde a una situación de mayor probabilidad que el piso se encuentre espacialmente presente, pero no determina la presencia o ausencia absoluta del piso dentro o fuera del área delimitada. Las zonas más determinantes que se mantienen corresponden a la extensión de la Pampa Del Tamarugal. Si bien, no se conserva con la misma área espacial (aumenta el área de distribución en un 53%), manifiesta una clara tendencia del piso que la compone (Bosque espinoso tropical interior de *Prosopis tamarugo* y *Tessaria absinthiodes*) a mantener un área de distribución acotada bastante acorde con las presentadas originalmente.

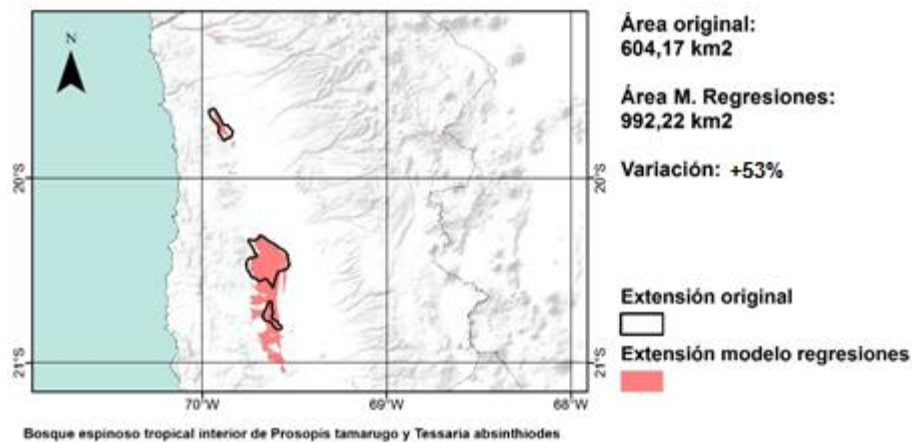


Figura N° 32: comparación espacial para la Pampa del Tamarugal entre la extensión original del piso y la extensión propuesta. Fuente: Elaboración propia.

5.2.2 Variación de los pisos vegetales frente a escenarios de cambio climático.

A continuación se procede a la cuantificación del cambio de los pisos vegetales respecto de los escenarios de cambio climático. Para este fin, se procedió a dividir los pisos según grupos de acuerdo a la formación vegetal dominante en cada uno de ellos.

5.2.2.1 Pisos del bosque espinoso

Se encuentran compuestos por los pisos del Bosque espinoso tropical andino de *Browningia candelaris* y *Corryocactus brevistylus*, del Bosque espinoso tropical interior de *Geoffroea decorticans* y *Prosopis alba* y del Bosque espinoso tropical interior de *Prosopis tamarugo* y *Tessaria absinthiodes*.

La variación en los pisos dentro de la formación del Bosque espinoso para el año 2050 estaría implicando importantes cambios en todos los casos, que se encontraría afectando indistintamente a todos los pisos de la formación.

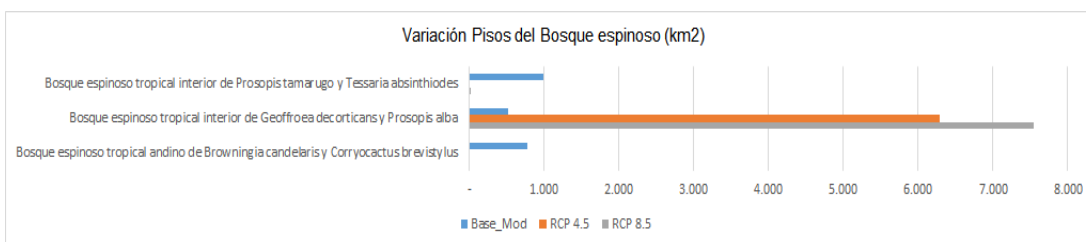


Figura N° 33: Variación de superficie en kilómetros cuadrados de los pisos correspondientes al Bosque espinoso. Fuente: Elaboración propia.

Bajo esta premisa, ocurren casos representativos como lo es el caso de la actual extensión de la Pampa del Tamarugal. Tanto en los escenarios RCP 4.5 y 8.5 estarían ocurriendo importantes cambios ambientales que afectarían negativamente a este piso (Bosque espinoso de *Prosopis tamarugo* y *Tessaria absinthiodes*) provocando su desaparición tal y como se le conoce.

Excepcionalmente en el escenario RCP 8.5, estaría presente una delgada franja que presentaría las condiciones ambientales idóneas para dicho piso. Esta franja se localizaría

al norte Camiña, en las zonas más bajas de la Precordillera, algo distanciada al punto más septentrional del piso en la región actualmente (cerca de Pisagua), la cual sería proporcionalmente menor, con sólo 26km² de cobertura, correspondientes al 0% respecto de la totalidad de los pisos proyectados. Esta condición sólo sería posible si las especies contenidas en el piso tuviesen la capacidad de dispersión adecuada para desplazarse, que en el caso de la Pampa del Tamarugal no sería posible.

En el caso del piso del Bosque espinoso tropical interior de *Geoffroea decorticans* y *Prosopis alba* se estarían dando explosivos aumentos en su extensión espacial para el caso de ambos escenarios RCP.

En el escenario RCP 4.5 pasarían a ocupar la actual distribución de la Pampa del Tamarugal y buena parte de la depresión central al sur de Pozo Almonte; respecto de su localización original se prevé un angostamiento de su distribución, mediante la reducción presencial en las partes altas de la quebrada de Chiza (entre las quebradas de Camarones y Tana) que se encontraría siendo reemplazado por extensiones del Matorral desértico y el Desierto tropical interior con vegetación escasa.

“Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de Cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y Modelos de Circulación Global de muy, muy alta resolución”.

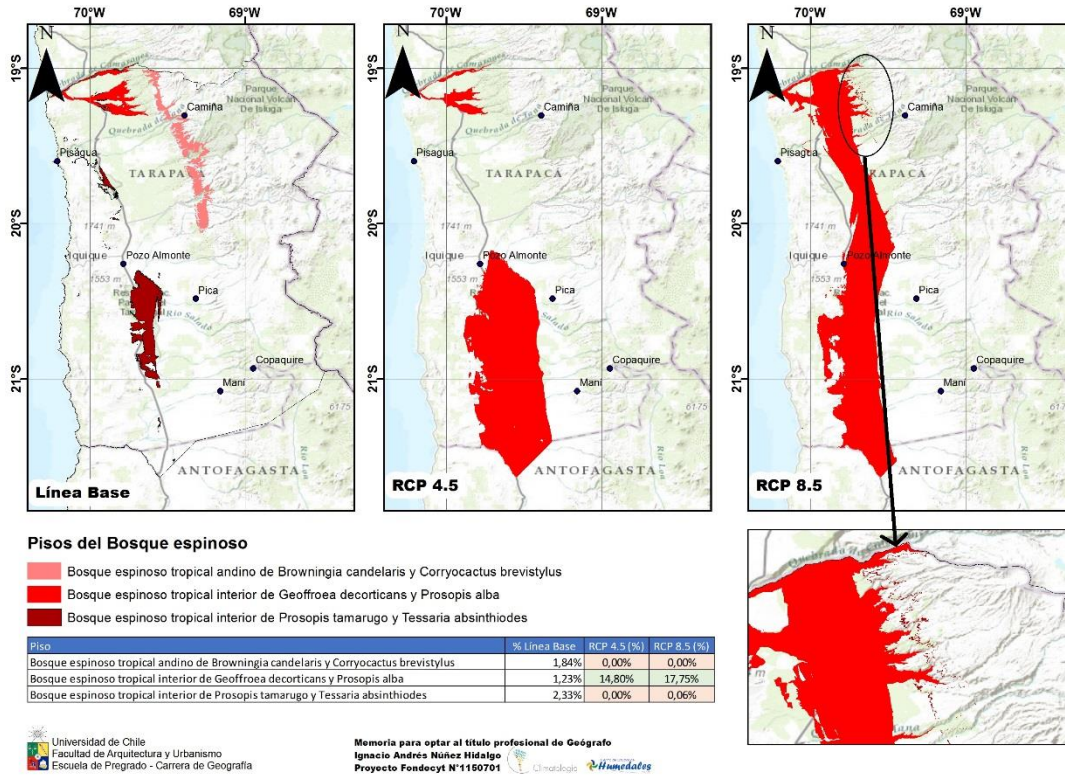


Figura N° 34: Cambios proyectados en los pisos pertenecientes a la formación del Bosque espinoso en los escenarios RCP 4.5 y 8.5 generados a partir del ensamble de los GCM CSIRO_Mk_3_6 y HaDGEM_2 para el año 2050. Fuente: Elaboración propia.

Para el escenario RCP 8.5 el piso pasaría a distribuirse por toda la extensión de la Depresión Central, conectando a la Pampa del Tamarugal con las quebradas de Chiza y Camarones, y dando una franja ininterrumpida para este a lo largo de toda la región.

Respecto del piso del Bosque espinoso tropical andino de *Browningia candelaris* y *Corryocactus brevistylus* ocurre una tendencia similar al piso del Bosque espinoso tropical interior de *Prosopis tamarugo* y *Tessaria absinthiodes*. Sólo que su distribución pasaría a abarcar una delgada y casi imperceptible franja de menos de 1000km² localizada entre el poblado de Camiña y el límite regional, que se encontraría fuertemente influenciada por pisos del Desierto absoluto y el Matorral bajo desértico.

5.2.2.2 Pisos del desierto absoluto

Se encuentra compuesto por los pisos del Desierto tropical costero con vegetación escasa y el Desierto tropical interior con vegetación escasa, los cuales no asocian ningún dominio vegetal específico debido a que sus proporciones en los pisos son muy menores. La composición de estos pisos no determina la extensión del Desierto de Atacama, sólo manifiesta parte de su dominio, caracterizándose por ser el elemento más árido de este.

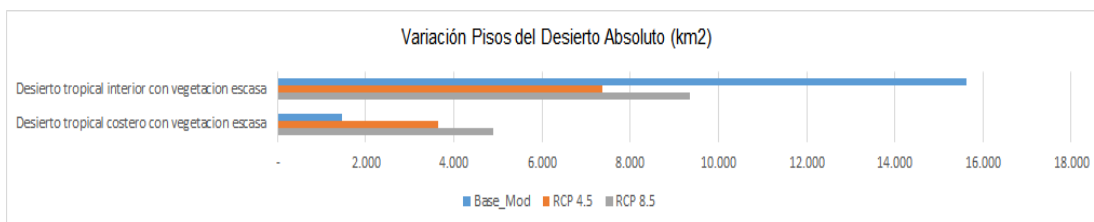
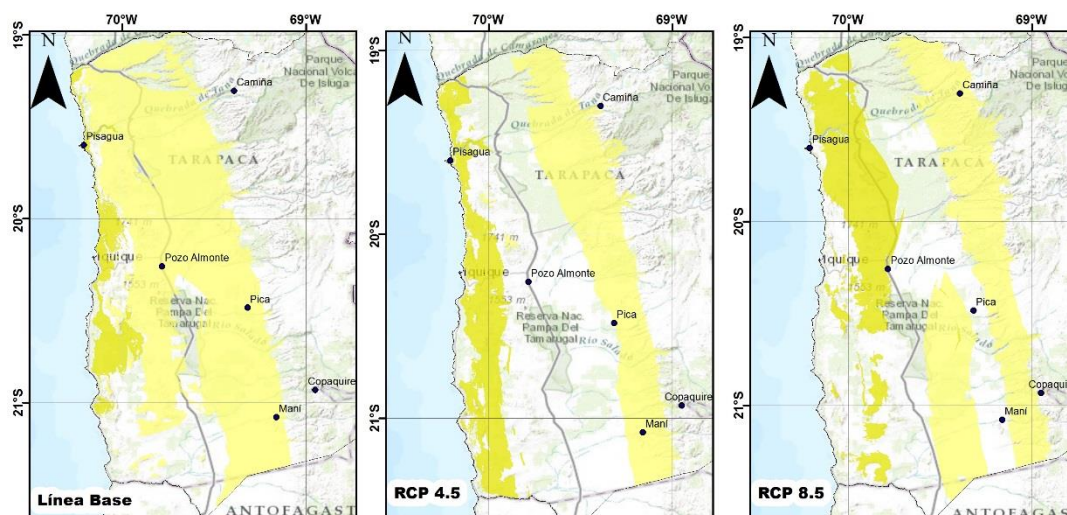


Figura N° 35: Variación de superficie en kilómetros cuadrados de los pisos correspondientes al Desierto absoluto. Fuente: Elaboración propia.

La variación extensiva de estos pisos se manifiesta con tendencia a su reducción en ambos casos y en ambos escenarios RCP. Las condiciones vienen asociadas a una redistribución de los patrones vegetales asociados al Matorral desértico y el Bosque espinoso (que compartirían su localización en forma parcial con ambientes más áridos), estos resultados son acordes con los obtenidos recientemente por MARQUET *et al.* (2014) para la formación del Desierto absoluto.

Además el escenario RCP 4.5 se encontraría siendo más agresivo respecto de la población de zonas hiper-áridas que el escenario RCP 8.5, principalmente debido a la tendencia en las precipitaciones de las variables bioclimáticas utilizadas.

“Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de Cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y Modelos de Circulación Global de muy, muy alta resolución”.



Pisos del Desierto Absoluto

- Desierto tropical costero con vegetación escasa
- Desierto tropical interior con vegetación escasa

Piso	% Línea Base	RCP 4.5 (%)	RCP 8.5 (%)
Desierto tropical costero con vegetación escasa	3,42%	8,60%	11,49%
Desierto tropical interior con vegetación escasa	36,74%	17,35%	21,98%

Universidad de Chile
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Escuela de Pregrado - Carrera de Geografía

Memoria para optar al título profesional de Geógrafo
Ignacio Andrés Núñez Hidalgo
Proyecto Fondecyt N°1150701



Figura N° 36: Cambios proyectados en los pisos pertenecientes a la formación del Desierto absoluto en los escenarios RCP 4.5 y 8.5 generados a partir del ensamble de los GCM CSIRO_Mk_3_6 y HaDGEM_2 para el año 2050. Fuente: Elaboración propia.

Especialmente en el escenario RCP 4.5 ocurre una fuerte extensión del dominio del desierto tropical costero por toda la franja de la Cordillera de la Costa, que tiende a reemplazar la extensión de algunos pisos del matorral desértico tropical costero, formando una fuerte barrera bioclimática que extiende uniformemente la hiper-aridez del piso en toda la franja costera. Esta situación queda revertida en el escenario RCP 8.5, donde ocurre un desplazamiento del piso hacia el norte, seguido de un ensanchamiento y una posterior fragmentación hacia el sur del piso.

Respecto al desierto tropical interior se distingue un plegamiento de este en el escenario RCP 4.5, que luego resulta inverso en el escenario RCP 8.5. Las fuerzas que conjugan esta distribución van relacionadas con la incidencia de las precipitaciones en la región, donde se presenta una dualidad de pisos entre aquellos pertenecientes al Matorral desértico interior y el Bosque espinoso.

“Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de Cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y Modelos de Circulación Global de muy, muy alta resolución”.

Además, en ambos escenarios RCP que el desierto absoluto no se encontraría avanzando sobre la quebrada de Chiza, pero sí sobre el resto de las quebradas al sur de esta (tal como la quebrada de Tana), logrando así un avance importante en altitud que alcanzaría hasta las partes bajas de la Cordillera Occidental, afectando al 5% y hasta el 15% del Parque Nacional Volcán Isluga en torno a los escenarios RCP 4.5 y 8.5 respectivamente, y con avances medios altitudinales respectivos de 10km a 20km en cada escenario propuesto.

5.2.2.3 Pisos del matorral bajo de altitud

Los pisos que contienen a esta formación vegetal suman un total de ocho, corresponden a los pisos del Matorral bajo tropical andino de *Azorella compacta* y *Pycnophyllum molle*, del Matorral bajo tropical andino de *Fabiana denudata* y *Chuquiraga atacamensis*, del Matorral bajo tropical andino de *Fabiana ramulosa* y *Diplostephium meyenii*, del Matorral bajo tropical andino de *Fabiana squamata* y *Festuca chrysophylla*, del Matorral bajo tropical andino de *Mulinum crassifolium* y *Urbania pappigera*, del Matorral bajo tropical andino de *Parastrephia lepidophylla* y *Parastrephia quadrangularis*, del Matorral bajo tropical andino de *Parastrephia lucida* y *Azorella compacta* y del Matorral bajo tropical andino de *Parastrephia lucida* y *Festuca orthophylla*. Encontrándose mayormente distribuidos en el Altiplano Andino, y caracterizándose por contener subconjuntos vegetacionales que albergan comunidades azonales localizadas cerca de las numerosas vegas y bofedales existentes.

Dentro del área de estudio ocupan el margen más oriental, y abarcan intrincadas formas y variedades vegetales endémicas en el sur de Sudamérica (ARROYO *et al.*, 1982 en JAKSIC *et al.*, 1997) que se encuentran ampliamente influenciadas por la altitud, las precipitaciones y las temperaturas locales.

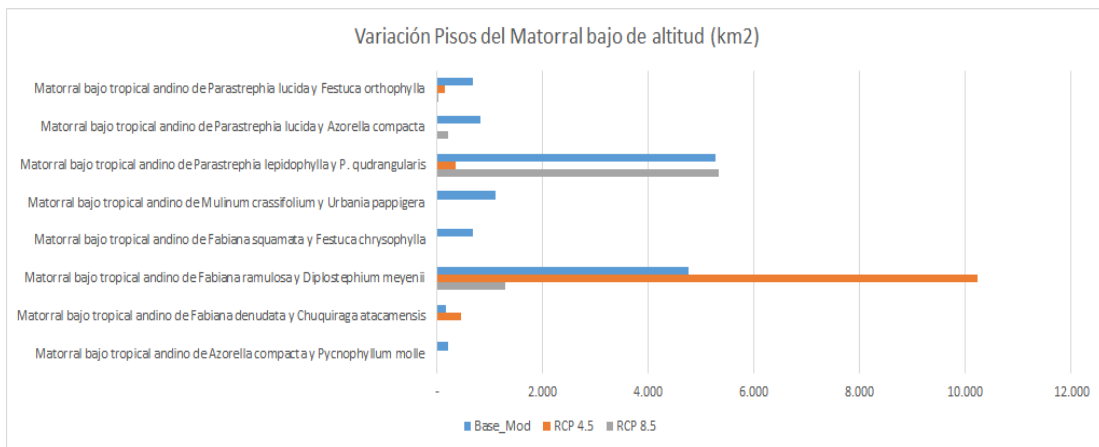


Figura N° 37: Variación de superficie en kilómetros cuadrados de los pisos correspondientes al Matorral bajo de altitud. Fuente: Elaboración propia.

Estos pisos llegan a presentar amplias variaciones, desde se observa una clara tendencia a la reducción de variedades vegetales en ambos escenarios RCP. Destaca el predominio del Matorral bajo tropical andino de *Fabiana ramulosa* y *Diplostephium meyenii* en el escenario RCP 4.5, que se extiende predominando significativamente sobre todos los pisos vegetales (de los cuales cuatro reducen su distribución a 0%) presentes para la formación. Adicionalmente, sólo dos pisos se encuentran con presencia en el escenario RCP 4.5 (Matorral bajo tropical andino de *Fabiana denudata* y *Chuquiraga atacamensis* y Matorral bajo tropical andino de *Parastrephia lepidophylla* y *P. quadrangularis*), manifestando su distribución en torno a las altas cumbres de la región y en la parte alta de la cuenca del río Salado.

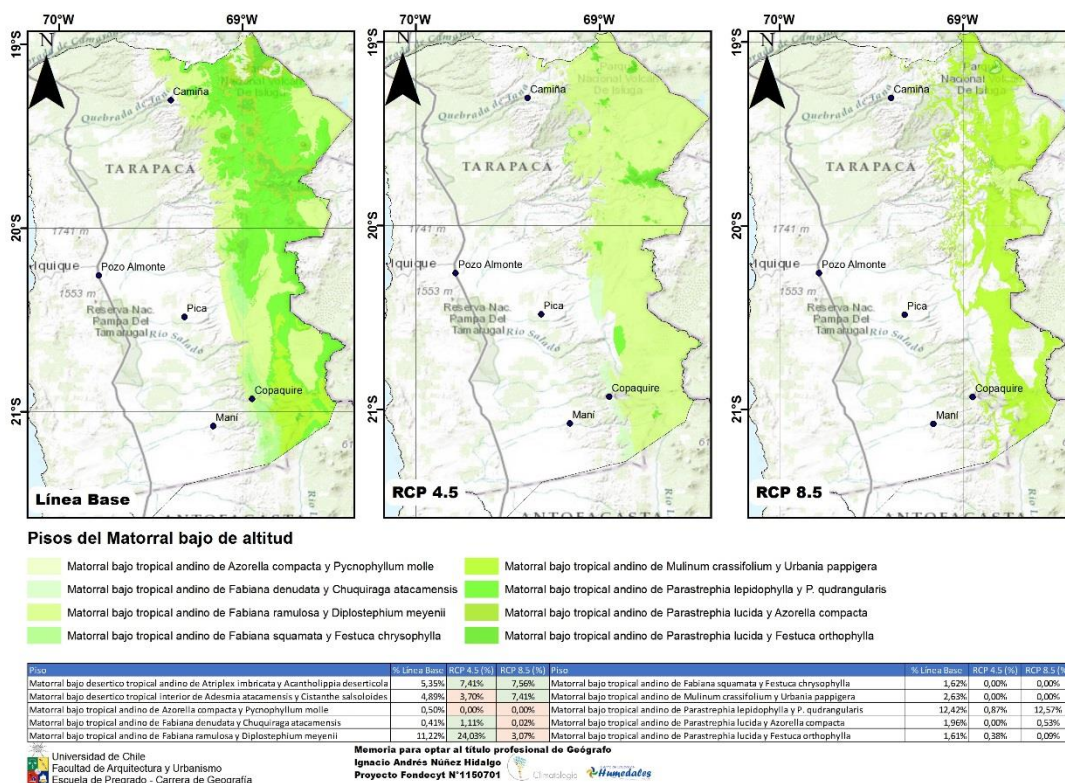


Figura N° 38: Cambios proyectados en los pisos pertenecientes a la formación del Matorral bajo de altitud en los escenarios RCP 4.5 y 8.5 generados a partir del ensamble de los GCM CSIRO_Mk_3_6 y HaDGEM_2 para el año 2050. Fuente: Elaboración propia.

En el caso del escenario RCP 8.5 ocurre un comportamiento más drástico. Si bien el escenario compone mayor variedad de pisos vegetales, los pisos del Matorral bajo de altitud tienden a separarse dando paso al aumento del matorral bajo desértico en extensiones del Altiplano del área de estudio. El piso más representativo corresponde al Matorral bajo

tropical andino de *Parastrephia lepidophylla* y *P. quadrangularis*. Su área de distribución no cambia mucho, pero si su forma. Ocurren importantes discontinuidades del piso en torno a los 19°S y los 20°S que se asocian al dominio de los pisos del Matorral bajo desértico, relacionando un avance de condiciones áridas sobre el Altiplano andino en el área de estudio.

Contrariamente que con el escenario RCP 4.5, en el escenario RCP 8.5 el piso del Matorral bajo tropical andino de *Fabiana ramulosa* y *Diplostephium meyenii* queda acotado únicamente a su condición más oriental en el área de estudio, con importantes divisiones en las dependencias al sur del Parque Nacional Volcán Isluga y con su desaparición en las partes altas del altiplano al sur del río Salado.

5.2.2.4 Pisos del matorral bajo desértico

Esta formación se encuentra compuesta por dos pisos vegetales que corresponden al Matorral bajo desértico tropical andino de *Atriplex imbricata* y *Acantholippia deserticola* y al Matorral bajo desértico tropical interior de *Adesmia atacamensis* y *Cistanthe salsoloides*. Su distribución ocupa las cabeceras de las cuencas precordilleranas del área de estudio y se caracterizan por crecer en suelo desnudo.

El segundo piso se caracteriza por presentar condiciones ambientales de regeneración tendencialmente influenciadas por la ocurrencia de lluvias estivales (LUEBERT & PLISCOFF, 2006), por lo que su distribución se estaría acotando respecto de los umbrales de tolerancia de esta especie, que no superan los 100mm anuales (obtenido de las curvas de respuesta generadas por el modelo).

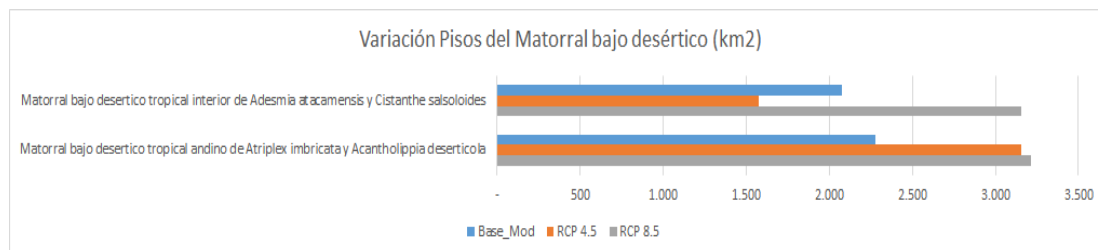
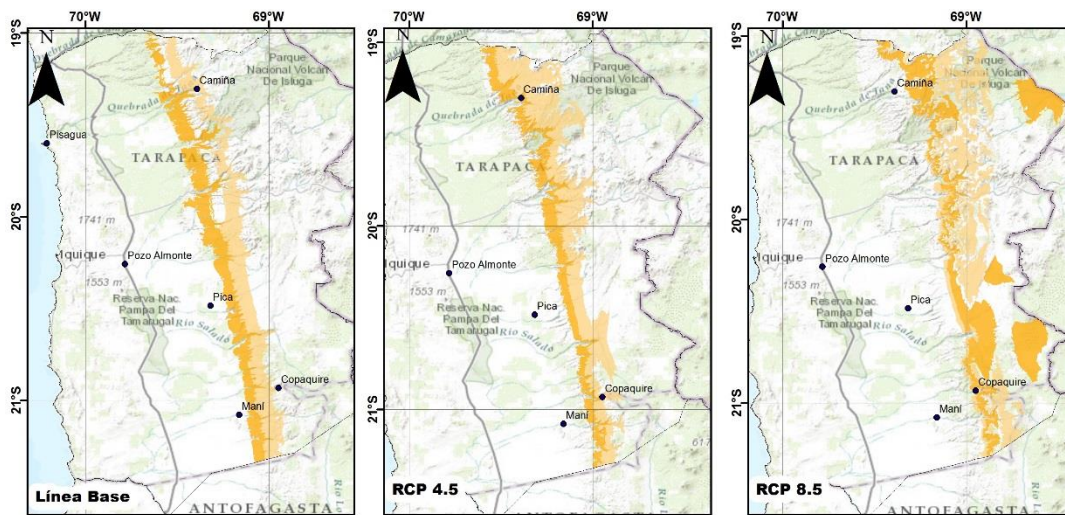


Figura N° 39: Variación de superficie en kilómetros cuadrados de los pisos correspondientes al Matorral bajo desértico. Fuente: Elaboración propia.

La variación de estos pisos para el área de estudio no sobrepasa tasas del 50%, logrando más una re-distribución hacia mayores altitudes que le supera en competencia a los pisos

del Matorral bajo de altitud, que una disminución/aumento muy severa en los pisos. Estas variaciones ocurren en ambos escenarios RCP pero son mayores para el caso del escenario RCP 8.5, debido a que la proporción espacial de sus pisos aumenta en casi 1000km² y 750km² respectivamente para cada piso.



Pisos del Matorral bajo desértico

- Matorral bajo desértico tropical andino de *Atriplex imbricata* y *Acantholippia deserticola*
- Matorral bajo desértico tropical interior de *Adesmia atacamensis* y *Cistanthe salsoloides*

Piso	% Línea Base	RCP 4.5 (%)	RCP 8.5 (%)
Matorral bajo desértico tropical andino de <i>Atriplex imbricata</i> y <i>Acantholippia deserticola</i>	5,35%	7,41%	7,56%
Matorral bajo desértico tropical interior de <i>Adesmia atacamensis</i> y <i>Cistanthe salsoloides</i>	4,89%	3,70%	7,41%

Universidad de Chile
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Escuela de Pregrado - Carrera de Geografía

Memoria para optar al título profesional de Geógrafo
Ignacio Andrés Núñez Hidalgo
Proyecto Fondecyt N°1150701



Figura N° 40: Cambios proyectados en los pisos pertenecientes a la formación del Matorral bajo desértico en los escenarios RCP 4.5 y 8.5 generados a partir del ensamble de los GCM CSIRO_Mk_3_6 y HaDGEM_2 para el año 2050. Fuente: Elaboración propia.

Existe una importante variación hacia mayores altitudes de los pisos que componen esta formación. En el caso del piso del Matorral bajo desértico tropical andino de *Atriplex imbricata* y *Acantholippia deserticola*, mediante un comportamiento migratorio se provocaría un aumento altitudinal de hasta 700msnm y 1200msnm respectivamente en cada escenario RCP, abarcando distancias medias de 10km y 35km en algunas zonas del área de estudio de acuerdo a cada escenario propuesto.

Especies como la *Atriplex imbricata* y la *Adesmia atacamensis* no soportan las heladas asociadas a las bajas temperaturas, así su presencia en zonas del Altiplano se encontraría

respaldada bajo el supuesto de las variables bioclimáticas que denotan un aumento general en las temperaturas mínimas del área de estudio.

5.2.2.5 Pisos del matorral desértico

Los pisos de esta formación corresponden a cuatro y se componen del Matorral desértico tropical costero de *Ephedra breana* y *Eulychnia iquiquensis*, al Matorral desértico tropical costero de *Nolana adansonii* y *N. lycioides*, al Matorral desértico tropical interior de *Atriplex atacamensis* y *Tessaria absinthioides* y al Matorral desértico tropical interior *Malesherbia auristipulata* y *Tarasa rahmeri*. Su distribución ocupa las zonas costeras del área de estudio y parte de la Depresión Central al sur de la Pampa del Tamarugal.

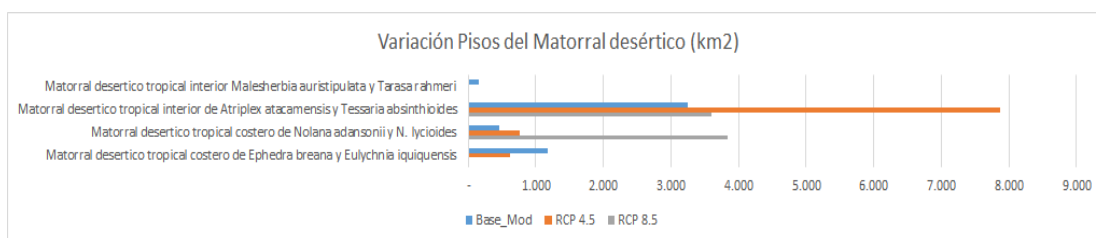


Figura N° 41: Variación de superficie en kilómetros cuadrados de los pisos correspondientes al Matorral desértico. Fuente: Elaboración propia.

La variación espacial de este grupo de pisos presenta amplios contrastes. En dos pisos ocurren explosivos aumentos de extensión, y en dos pisos (Matorral desértico tropical interior de *Malesherbia auristipulata* y *Tarasa rahmeri* y Matorral desértico tropical costero de *Ephedra breana* y *Eulychnia iquiquensis*) ocurren disminuciones drásticas. En ese sentido el escenario RCP 4.5 resulta ser el que presenta aumento más drásticos, donde el piso del Matorral desértico tropical interior de *Atriplex atacamensis* y *Tessaria absinthioides* aumenta en un 143% su extensión espacial respecto de lo observado en la línea base.

Por su parte, en el escenario RCP 8.5 el piso correspondiente al Matorral desértico tropical costero de *Nolana adansonii* y *N. lycioides* aumenta también su distribución en torno a un 741%. Si bien este presenta una expansión porcentual mayor que el piso anteriormente visto, su extensión final resulta comparativamente menor.

En un caso inverso, el piso del Matorral desértico tropical interior de *Malesherbia auristipulata* y *Tarasa rahmeri* disminuye su distribución al punto de desaparecer en ambos modelos RCP.

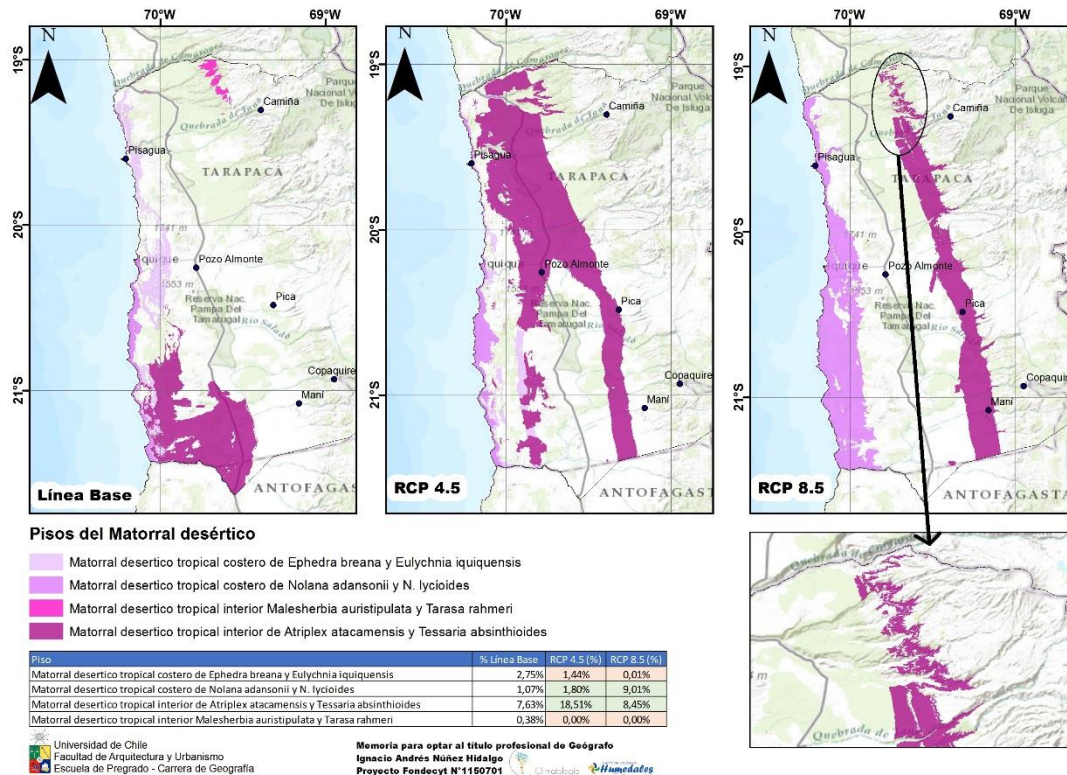


Figura N° 42: Cambios proyectados en los pisos pertenecientes a la formación del Matorral desértico en los escenarios RCP 4.5 y 8.5 generados a partir del ensamble de los GCM CSIRO_Mk_3_6 y HaDGEM_2 para el año 2050. Fuente: Elaboración propia.

Respecto de la distribución espacial ocurren importantes re-ordenaciones en el territorio para los pisos que componen a la formación vegetal, la distribución del Matorral desértico tropical interior de *Atriplex atacamensis* y *Tessaria absinthioides* casi desaparece respecto de su área de distribución original, provocando una fuerte tendencia a la migración hacia el norte de este piso, por vastas extensiones de la Depresión Central en el caso del escenario RCP 4.5, y un fuerte plegamiento a los límites entre la misma Depresión y los fondos y cabeceras de quebrada de la Precordillera en el escenario RCP 8.5.

Los pisos asociados a esta formación se encuentran en un ámbito de dualidad con aquellos pertenecientes al Desierto absoluto. Su relocalización implica cambios muy significativos entre uno u otro, pues implican el desplazamiento de la condición de hiper-aridez del

Desierto de Atacama al presentar condiciones más híbridas de vegetación, donde estén presentes conjuntos vegetales que antes no podrían subsistir ambientalmente en dichas locaciones.

Sin embargo, el piso del Matorral desértico tropical interior de *Malesherbia auristipulata* y *Tarasa rahmeri* tiende a desaparecer en ambos escenarios RCP. Esto es preocupante debido a que LUEBERT & PLISCOFF (2006) sostienen que el conocimiento que se tiene de este piso es muy bajo, el que bien podría contener especies endémicas no documentadas que presentarían una tendencia futura a desaparecer.

Por otra parte, el piso del Matorral desértico tropical costero de *Ephedra breana* y *Eulychnia iquiquensis* presenta condiciones de distribución que trascienden únicamente a las variables bioclimáticas modeladas debido a que dependen de la existencia de neblinas costeras más que de la incidencia de precipitaciones, su actual cambio en la distribución se estaría viendo afectada más por las temperaturas per se.

5.3 Variabilidad en la modelación y proyección de la especie *Deyeuxia curvula*

La *D. curvula* es una especie gramínea perenne denominada vulgarmente como “pasto vicuña” (RUGOLO, 2006; SAG, 2006), y se distingue por ser una de las especies principales que componen los humedales Altoandinos, constituyendo una de las fuentes alimenticias principales del ganado camélido en el Altiplano Andino (CASTELLARO *et al.*, 2004).

Se procedió a determinar la variabilidad de la especie *D. curvula* bajo los escenarios de cambio climático ya utilizados (RCP 4.5 y RCP 8.5), para identificar la variabilidad de la especie dentro del Altiplano andino en el área de estudio.

Tener la habilidad de generar matices respecto a cómo variará la especie bajo los escenarios de cambio climático propuestos, permitirá concentrar esfuerzos y perspectivas en torno a los puntos críticos fundamentales para el desarrollo y existencia de las comunidades locales que coexisten en el entorno y sean dependientes de la actividad ganadera en el Altiplano.

Bajo este supuesto, los resultados para el modelo resaltan condiciones muy saludables para la especie. El área de selección inicial corresponde a 6408,66km², donde la mayor proporción de la especie presenta rangos de presencia entre un 60% - 70%.

“Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de Cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y Modelos de Circulación Global de muy, muy alta resolución”.

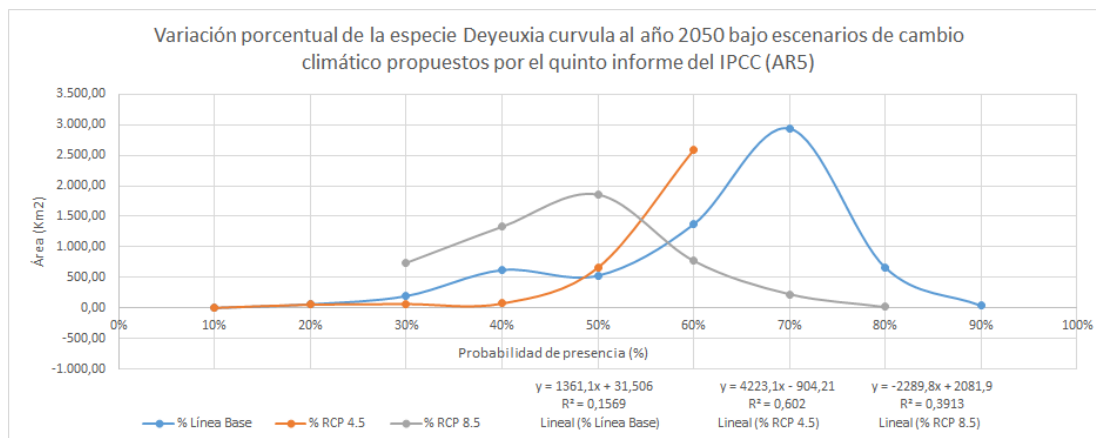


Figura N° 43: Variación proporcional de la especie *D. curvula* para los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5. Fuente: Elaboración propia.

Esta situación queda revertida en ambos escenarios RCP, donde se da una respuesta negativa de la especie a medida que la severidad del escenario aumenta.

El escenario RCP 4.5 presenta máximas distribuciones en torno al 50% de presencias, lo que significa que para el pixel interpolado existirá una probabilidad del 50% que la especie se encuentre allí. Esta condición de presencia será menor para mayores proporciones.

En tanto, en el escenario RCP 8.5 ocurre que la proporción máxima de la especie corresponderá con su máxima probabilidad de presencia. Se presenta una fuerte tendencia a la saturación máxima con porcentajes no mayores al 60% en las distribuciones, que limitarán severamente a la especie.

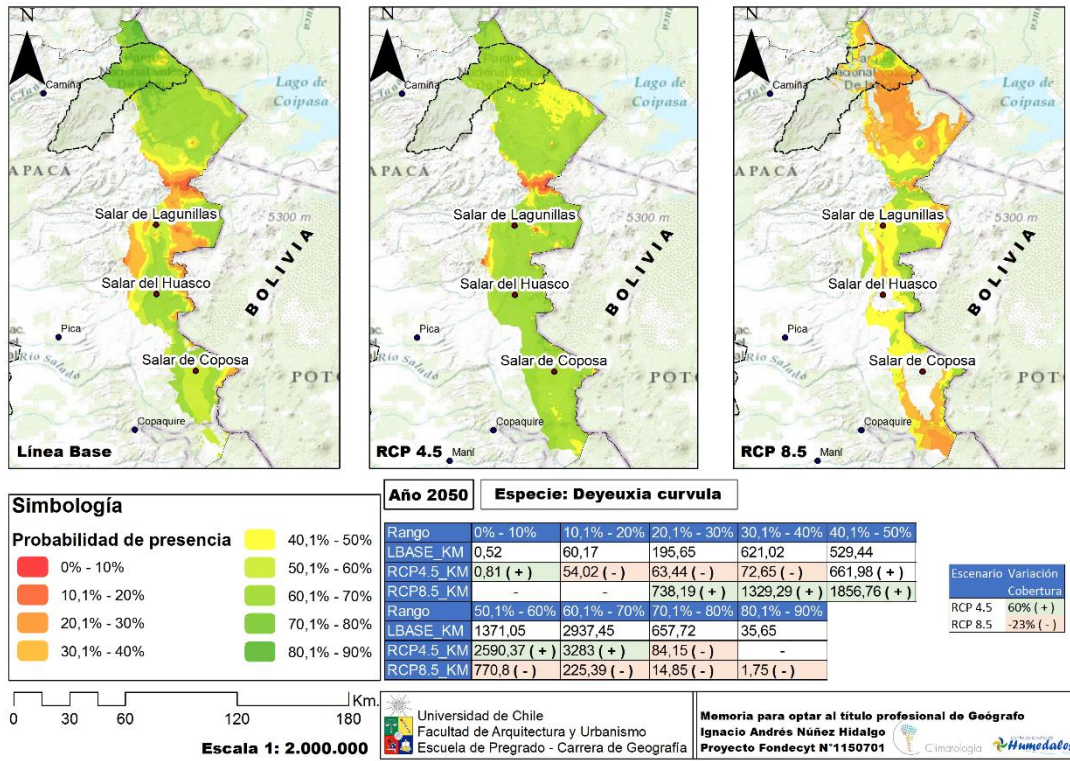


Figura N° 44: Variación de la especie *D. curvula* según los escenarios RCP 4.5 y 8.5 al año 2050 en el área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

La variabilidad espacial para la especie corrobora la tendencia a la reducción de su hábitat idóneo, donde quedan visibles mayores grados de fraccionamiento en ambos escenarios. Si bien el escenario RCP 4.5 manifiesta un aumento en su área máxima de distribución, no se respalda su hipotética expansión, debido a que los niveles de presencia han disminuido mucho en ciertas zonas.

Es en el Parque Nacional Volcán Isluga donde ocurren los mayores cambios, se experimentarán severas reducciones en los valores máximos de entropía de la especie, pero que seguirá manteniéndose como un punto de “resistencia” dentro del área interpolada. Destacan los efectos sobre los salares del Salar del Huasco y Coposa, donde la distribución de la especie se discontinuaría, por los avances proyectados del Matorral bajo desértico en el escenario RCP 8.5, que podrían implicar procesos de aridización en el sector.

6. Discusiones

El proceso de selección, y el ajuste y cambio de las variables bioclimáticas posterior al proceso de regresión lineal múltiple y Downscaling, permitieron la creación y comparación de modelos de distribución de especie a niveles muy finos, con resoluciones de píxel equivalentes a 100 metros, que permitieron suplir los requerimientos necesarios manifestados por WILBY *et al.* (2002); para llevar a cabo el análisis de los pisos vegetacionales proyectados al año 2050 bajo los escenarios de cambio climático más recientemente impulsados por el IPCC.

Las nuevas variables bioclimáticas procedentes del proceso de regresión lineal múltiple y downscaling tienen la tendencia a redistribuir los datos suavizando los mínimos y aumentando los máximos. En ese sentido, ocurre que en el escenario RCP 4.5 no varían mucho los valores extremos de temperatura en las nuevas variables (en la mayoría de los casos), las que tienden a distribuirse en torno a barreras orográficas. Para las precipitaciones ocurre lo mismo. Las nuevas variables bioclimáticas expresan su tendencia a la baja en el escenario RCP 4.5, al igual que en los escenarios propuestos por el IPCC (2014). Sin embargo, con valores máximos inferiores que también se agruparían en torno a las altas cumbres del área de estudio. En el caso del escenario RCP 8.5, ocurren algunos casos aislados que aumentan los extremos respecto de la tendencia de las temperaturas, atribuyéndole al área de estudio condiciones más frías durante el mes y el trimestre más frío, pero a su vez, condiciones más cálidas durante el trimestre más seco. También ocurre que las precipitaciones serían menores, pero se mantendrían tendencialmente acertadas respecto de los escenarios originalmente propuestos en el quinto informe del IPCC sometidos al proceso de anomalías climáticas de BUYTAERT *et al.* (2009).

Los resultados finales en los modelos de pisos vegetales se mantienen sincrónicos con los resultados obtenidos por MARQUET *et al.* (2014), quienes lograron modelar las formaciones vegetales para todo Chile, coincidiendo el aparente avance del desierto absoluto y del Matorral bajo desértico por sobre el Matorral bajo de altitud, y la asociada expansión del Matorral desértico en la zona norte del país. De hecho, los resultados de los pisos vegetales en el área de estudio evidencian estos cambios: parte del desierto tropical interior con vegetación escasa se replegaría hacia mayores altitudes, seguido del matorral bajo desértico tropical andino que abarcaría zonas que actualmente son ocupadas por el matorral bajo tropical andino. Estas ocupaciones implicarían importantes reducciones de biodiversidad para el matorral bajo tropical andino, donde ocurriría una progresiva desertificación (asociada a las condiciones climáticas de los pisos vegetales) que sería mayor para el escenario RCP 8.5, en línea también a los resultados obtenidos por SARRICOLEA & ROMERO (2015). A su vez, parte del desierto tropical interior y costero (con vegetación escasa) sería reemplazado por una condición dual de matorral desértico y bosque espinoso que sería más dinámico en el escenario RCP 4.5 que en el escenario RCP 8.5. Los modelos de la especie *D. curvula* reflejan también importantes cambios según las

proyecciones. Para el año 2050 en el escenario RCP 4.5 ocurriría un aumento de su área de distribución a cambio de la disminución de su presencia, y en el escenario RCP 8.5 se presentarían disminuciones importantes tanto en área de distribución como en la probabilidad de presencia de sus nichos. En general, el comportamiento de la especie resulta sincrónico con el esperado de los ecosistemas para dicha área geográfica. Esto es un dato relevante, más aun teniendo en cuenta la distinta escala de elaboración de los modelos y variables utilizadas.

El alto desempeño logrado a través de MAXENT queda evidenciado a través de los valores obtenidos en las curvas de desempeño (la mayoría con un AUC sobre 0,9), y en la asunción de la teoría ecológica respecto a estos. Se acreditan importantemente los umbrales altitudinales de los pisos y especies y se presentan relaciones ecosistémicas que hacen variar la diversidad de pisos vegetacionales, donde ocurren procesos de degradación de los ecosistemas en el Altiplano, que al ver reducidas sus extensiones también reducen su diversidad, y a la vez reducen la diversidad de otros ecosistemas contiguos a estos, el comportamiento ocurre en sintonía con los postulados de biodiversidad presentadas en LAZO *et al.* (2008).

Sin embargo, los modelos presentan falencias que vienen asociadas a su nula capacidad de cuantificar variables no extrapolables al futuro, como la disponibilidad de aguas asociadas a fuentes subterráneas o la evapotranspiración potencial. Es por esto que se hace necesaria la realización de análisis de tendencias. En esta línea, estudios recientes de SARRICOLEA & ROMERO (2015) manifestaron a través del análisis de datos climáticos diarios que los ecosistemas Altoandinos podrían ser severamente afectados en el futuro producto del aumento de días secos y el presunto aumento en la intensidad de las precipitaciones porque disminuirían la tasa de recarga de los acuíferos, afectando innegablemente a las actividades económicas humanas presentes en el área de estudio. Este aporte refuerza el planteamiento de las variables bioclimáticas, e intensifica la potencial precisión de los supuestos presentados por las variables bioclimáticas.

Finalmente, queda en la palestra la estructura de conservación de los ecosistemas localizados dentro del área de estudio, queda una vez más evidenciada la deficiente estructura medioambiental en Chile; los postulados de FERNÁNDEZ (1999) y PLISCOFF & FUENTES (2008) quedan manifestados al ligar que sólo existen 2 áreas protegidas, que se encuentran limitadas en dimensiones y representatividad a sólo dos grupos: el bosque espinoso y el matorral bajo tropical andino; de modo que resulta imperante la necesidad de actualizar la normativa actual en pos de lograr una estructura de protección ecosistémica vinculada con las necesidades regionales, más que con las puramente económicas o estratégicas, respectivas a los territorios extremos del país.

7. Conclusiones

Los resultados tienen correspondencia con la hipótesis planteada en la presente memoria de título. Las tendencias efectivamente proyectan una reducción de la vegetación semi-desértica y un avance de la vegetación desértica e hiper-desértica sobre las zonas de transición al Altiplano. Esto implica, que los nuevos hallazgos están en el Altiplano, donde se evidencia una posible disminución de biodiversidad respecto de sus condiciones actuales hacia el futuro, agravando la variación negativa de los ecosistemas (incluso a nivel mundial), y posiblemente, por causa antrópica.

Por su parte, y bajo escenarios RCP 4.5 y 8.5 de cambio climático, el bosque espinoso y el matorral desértico (más propias de la depresión central y precordillera) podrían remontar a algunas zonas bajas, y de condición más hiper-árida del desierto, propiciando condiciones algo más híbridas en el futuro. Sin embargo, el avance del matorral desértico sobre el desierto tropical costero e interior podría estar asociado a la ocurrencia de eventos lluviosos extremos (más que a una presencia permanente de los pisos), propiciando con mayor frecuencia, eventos tales como el desierto florido.

En la selección de variables el coeficiente de Pearson ha sido de gran utilidad, incluso, la literatura científica respalda su uso. No obstante, algunos autores recomiendan Spearman (correlación no paramétrica), y se justifica para casos específicos (escases de datos, valores nominales o que sus distribuciones no sean normales), por ejemplo, para la precipitación. Inclusive, mediante la realización de selecciones aleatorias a través de modelos de ensamble como BIOMOD2 o SDM, que se enfocan en mezclar una batería de modelos de distribución de especie y procedimientos estadísticos.

Se debe considerar que en las regiones desérticas hay otras variables, tanto de suelo, como climáticas, que explicarían la distribución de pisos y especies. Por ejemplo los aportes de agua subterránea (Pampa del Tamarugal), las camanchacas, la salinidad de suelo, evapotranspiración, viento, etc. Sus limitaciones derivan de la imposibilidad de proyectar dichas variables al futuro, incluso de conocer su explotación antrópica.

De todos los métodos posibles de extra e interpolación se ha utilizado los de regresión lineal múltiple. Los resultados demuestran para cada variable bioclimática y en la línea de base y escenarios a 2050 resultados estadísticamente significativos. Lo interesante, es que este método permite conocer con cambios según altitud, latitud, distancia a la cuenca del Amazonas, etc. Que afectan a las temperaturas y la precipitación. No obstante, existen otros modelos no lineales como por ejemplo, SPLINES (que son utilizados en software ANUSPLIN), los cuales por su complejidad, no permiten hacer relaciones tan directas.

Cabe recordar que esta área del norte de Chile presenta una deficiente cobertura de estaciones meteorológicas, y el trabajo estadístico debe implicar fuertes correlaciones y

correcciones para suplir dichas falencias asociadas a sus distribución espacial (zona de la depresión central es la menos representada) y temporal (muchas estaciones son menores a 30 años, o se han descontinuado).

Resulta improbable determinar otro tipo de relaciones ecológicas de macro escala -como la configuración regional de la diagonal árida-, porque el alcance del estudio no permite su observación en su contexto apropiado. En ese sentido, sería interesante armar un nuevo conjunto de datos que incluyese una extensión territorial mayor, siempre y cuando las barreras tecnológicas no signifiquen trabas metodológicas que hagan inviable los cálculos matemáticos.

Los resultados contenidos en esta memoria permiten tener una perspectiva, respecto de cómo podría ser el futuro climático en la región de Tarapacá y el Norte del país, y enaltecen la necesidad de contar con un plan de acción para abordar las zonas críticas en función de la presunta disminución de la biodiversidad que podría afrontar el futuro de esta región, la cual tiene la capacidad de afectar negativamente al ser humano y sus actividades económicas y culturales en todos los niveles posibles.

Los escenarios para el caso de las temperaturas proyectan más variación en la región altiplánica que en la depresión y costa, consistente con otros trabajos (SARRICOLEA & ROMERO, 2015).

Para el caso de la precipitación, se espera disminuciones en gran parte de la región, sobretodo asociado al forzamiento orográfico, muy vinculado a la componente meridional, y en este caso, aumentando levemente en la franja precordillerana.

Finalmente, la variabilidad espacial proyectada para *D. curvula*, muestra una tendencia a la reducción de su hábitat o nicho, donde es visibles mayores grados de fraccionamiento en ambos escenarios. Si bien el escenario RCP 4.5 manifiesta un aumento en su área máxima de distribución, no se respalda hipotética expansión, debido a que los niveles de presencia potencial han disminuido mucho en ciertas zonas.

8. Referencias Bibliográficas

- ACEITUNO, P. (1998). Elementos del Clima en el Altiplano Sudamericano Vol. 44. *Revista Geofísica*.
- ALANIZ, A. (2014). Análisis de los cambios en la cobertura de los ecosistemas de la zona central de Chile (Regiones V, RM, VI) asociado a dinámicas de uso de suelo. Memoria para optar al título profesional de Geógrafo, Universidad de Chile. Inédito
- AMIGO, J., & RAMÍREZ, C. (1998). A bioclimatic classification of Chile: woodland communities in the temperate zone. Vol. 136, pp. 9-26. *Plant Ecology*.
- AUSTIN, A. (2007). Species distribution models and ecological theory: A critical assessment and some possible new approaches. pp. 1-19. *Ecological Modelling*.
- AUSTIN, M., BELBIN, P., MEYERS, J.-A., DOHERTY, M.-D., & LUOTO, M. (2006). Evaluation of statistical models for predicting plant species distributions: role of artificial data and theory Vol. 199, pp. 197–216. *Ecological Modelling*.
- BARROWS, C., ROTENBERRY, J., & ALLEN, M. (2010). Assessing sensitivity to climate change and drought variability of a sand dune endemic lizard pp. 731–736. *Biological Conservation*.
- BETTOLLI, M., VARGAS, W., & PENALBA, O. (2007). Aspectos metodológicos del uso del análisis de componentes principales en campos de anomalías de altura geopotencial en el sur de Sudamérica. Vol. 22, pp. 273-285. *Revista Brasileira de Meteorología*.
- BUYTAERT, W., CÉLLERI, R., & TIMBE, L. (2009). Predicting climate change impacts on water resources in the tropical Andes: Effects of GCM uncertainty (Vol. 36). *Geophysical Research Letters*.
- CALKINS, K. (2005). *An Introduction to Statistics: Measuring Correlation*.
- CARMONA, C. (2003). *Fractal Attraction. Capítulo 1: El orden y caos por medio de la entropía*. Tesis profesional como requisito parcial para obtener el título en Licenciatura en Artes Plásticas, Universidad de las Américas Puebla. Puebla, México.
- CASTELLARO, G., ULLRICH, T., WACKWITZ, B., & RAGGI, A. (2004). Composición botánica de la dieta de alpacas (*Lama pacos* L.) y llamas (*Lama glama*

L.) en dos estaciones del año, en praderas altiplánicas de un sector de la Provincia de Parinacota, Chile. Chile. *Revista Agricultura. Técnica*.

- CBD. (1992). Convenio sobre la biodiversidad biológica pp. 32. Organización de las Naciones Unidas.
- CEH. (2011). Guía Educación y sensibilización Ciudadana para la conservación y uso sustentable de los humedales de la Región de Tarapacá.
- CHEFAOUI, R. (2011). Applying species distribution modeling for the conservation of Iberian protected invertebrates.
- CONAF. (s/a). Cambio climático. Recurso web [en línea] <<http://www.conaf.cl/nuestros-bosques/bosques-en-chile/cambio-climatico/>>
- CONAF. (2015). Protección SNASPE. Recurso web [en línea] <<http://www.conaf.cl/incendios-forestales/prevencion/proteccion-snaspe/>>
- CONAMA. (2006). Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI: Informe final.
- CONAMA. (2008a). Plan de Acción Nacional de Cambio Climático. Comisión Nacional de Medio Ambiente.
- CONAMA. (2008b). Biodiversidad de Chile: Patrimonio y Desafíos Segunda Edición Actualizada ed., Vol. 1, pp. 320. Comisión Nacional de Medio Ambiente.
- DANIDA. (1996). Strategies of Individual Organizations. Copenhagen: Ministry of Foreign Affairs of Denmark.
- DEBLAUWE, V., NICOLAS, B., COUTERON, P., LEJEUNE, O., & BOGAERT, J. (2008). The global biogeography of semi-arid periodic vegetation patterns. *Global Ecology and Biogeography*.
- DGA. (2012). Levantamiento de información hidrogeológica para la modelación del acuífero de Pica, cuenca de la pampa del tamarugal, Región de Tarapacá. Informe Final.
- FAO. (2001). FAOCLIM 2.0. A World-Wide Agroclimatic Database.: Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- FAÚNDEZ, L. (2005). Descripción vegetacional salar del Huasco I región de Tarapacá.

- FERNÁNDEZ, P. (1999). Análisis crítico de la nueva institucionalidad forestal Vol. X, pp. 111-114. *Revista de Derecho*.
- FLINT, L., & FLINT, A. (2012). Downscaling future climate scenarios to fine scales for hydrologic and ecological modeling and analysis. *Ecological Processes*.
- GALLARDO, F. (2015). Geología y estructura de la Precordillera altiplánica entre 19°45'S y 20°00'S, región de Tarapacá, Chile. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias, mención Geología., Universidad de Chile.
- GANN, G., & LAMB, D. (2006). La restauración ecológica – un medio para conservar la biodiversidad y mantener los medios de vida.
- GONCALVES, E., HERRERA, I., DUARTE, M., BUSTAMANTE, R., LAMPO, M., VELÁSQUEZ, G., . . . GARCÍA-ANGEL, S. (2014). Global invasion of Lantana camara: Has the Climatic Niche Been Conserved across Continents?
- GRILLI, A., AGUIRRE, E., DURAN, M., TOWNSEND, F., & GONZÁLEZ, A. (1999). Origen de las aguas subterráneas del sector Pica-salar del Huasco, provincia de Iquique, I región de Tarapacá
- GRINNELL, J. (1917). The Niche-Relationship of the California Trasher.
- GUISAN, A., & THULLIER, W. (2005). Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. pp. 993–1009. *Ecology Letters*.
- HAJEK, E., & DI CASTRI, F. (1975). Bioclimatografía de Chile: Dirección de Investigación, Vice Rectoría Académica. Universidad Católica de Chile, Santiago.
- HERNANDEZ, R., FERNANDEZ-COLLADO, C., & BAPTISTA, P. (2006). Metodología de la investigación. 4ta Edición. Editorial Mc Graw Hill.
- HIDALGO, H., DETTINGER, M., & CAYAN, D. (2008). Downscaling with constructed analogues: Daily precipitation and temperature fields over the United States.
- HIJMANS, R., CAMERON, S., PARRA, J., JONES, P., & JARVIS, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas.
- HORTAL, J., BORGES, P. A. V., & DINIS, F. (2005). Using ATLANTIS – Tierra 2.0 and GIS environmental information to predict the spatial distribution and habitat suitability of endemic species: Direcção Regional de Ambiente and Universidade dos Açores, Horta, Angra do Heroísmo and Ponta Delgada, Horta, Faial.

- HOWARD, C., STEPHENS, P., PEARCE-HIGGINS, J., GREGORY, R., & WILLIS, S. (2014). Improving species distribution models: the value of data on abundance Vol. 5, pp. 506–513. *Methods in Ecology and Evolution*.
- HUTCHINSON, E. (1957). Concluding Remarks.
- IPCC. (2001). Working Group I: The Scientific Basis. Recurso Web: [en línea] < <http://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg1/380.htm>>
- JAKSIC, F., MARQUET, P., & GONZÁLEZ, H. (1997). Una perspectiva ecológica sobre el uso del agua en el norte grande: la región de Tarapacá como estudio de caso.
- JEFFREY, S., ROTSTAYN, L., COLLIER, M., DRAVITZKI, S., HAMALAINEN, C., MOESENDER, C. . . . SYKTUS, J. (2013). Australia’s CMIP5 submission using the CSIRO-Mk3.6 model. Vol. 63, pp. 1-13. *Australian Meteorological and Oceanographic Journal*.
- KEFI, S., RIETKERK, M., ALADOS, C., PUEYO, Y., PAPANASTASIS, V., ELAICH, A., & DE RUITER, P. (2007). Spatial vegetation patterns and imminent desertification in Mediterranean arid ecosystems.
- LEEMANS, R., & CRAMER, W. (1991). The IIASA Database for Mean Monthly Values of Temperature, Precipitation, and Cloudiness on a Global Terrestrial Grid: International institute for applied system analysis.
- LEUSCHNER, C. (2005). Vegetation and ecosystems. pp. 85 - 105. *Vegetation ecology van der Maarel, E.* Editorial Blackwell Science Oxford.
- LUEBERT, F., & PLISCOFF, P. (2006). Sinopsis Bioclimática y Vegetacional de Chile: Editorial Universitaria.
- MARKE, T., MAUSER, W., PFEIFFER, A., & ZANGL, G. (2011). A pragmatic approach for the downscaling and bias correction of regional climate simulations. *Evaluation in hydrological modeling*.
- MARQUET, P., ABADES, S., ARMESTO, J., BARRIA, I., ARROYO, M., GAJARDO, R.,... VICUÑA, S. (2014). Estudio de vulnerabilidad de la biodiversidad terrestre en la eco-región mediterránea, a nivel de ecosistemas y especies, y medidas de adaptación frente a escenarios de cambio climático.

- MARTÍNEZ, N. (2013). El nicho ecológico: útil concepto aún en debate. In Cienciorama. Universidad Nacional de Mexico, Mexico.
- MATEO, R., FELICÍSIMO, A., & MUÑOZ, J. (2011). Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética (Vol. 84, pp. 217-240). *Revista Chilena de Historia Natural*.
- MEA. (2005). Ecosystems and Human Well-being: Desertification Synthesis.
- MESQUITA, S., & SOUSA, A. (2009). Bioclimatic mapping using geostatistical approaches: application to mainland Portugal pp. 2156–2170. *International Journal of Climatology*.
- METOFFICE. (2014). Regional Climate Model (RCM). Recurso Web: [en línea] <<http://ukclimateprojections.metoffice.gov.uk/23249>>
- MINVIELLE, M., & GARREAUD, R. (2011). Projecting rainfall changes over the South American Altiplano. Vol. 24, pp. 166-177. *Journal of Climate*.
- MITCHELL, T. (1997). Machine learning. McGraw Hill.
- MORALES, N. (2012). Modelos de distribución de especies: Software Maxent y sus aplicaciones en Conservación Vol. 2, pp. 1-5. *Revista Conservación Ambiental*.
- MOREIRA, D., DE LA BARRERA, F., & BUSTAMANTE, R. (2014). Distance to suburban/wildland border interacts with habitat type for structuring exotic plant communities in a natural area surrounding a metropolitan area in central Chile.
- NEW, M., LISTER, D., HULME, M., & MAKIN, I. (2002). A high-resolution data set of surface climate over global land areas (Vol. 21, pp. 01-25). *Climate Research*.
- NINYEROLA, M., PONS, X., & ROURE, J. (2005). Atlas Climático Digital de la Península Ibérica: Metodología y aplicaciones en bioclimatología y geobotánica.
- NORRIS, D. (2014). Model thresholds are more important than presence location type: Understanding the distribution of lowland tapir (*Tapirus terrestris*) in a continuous Atlantic forest of southeast Brazil. (Vol. 7, pp. 529-547). *Tropical Conservation Science: Mongabay.com Open Access Journal*.
- NOSS, R. (1990). Indicators for monitoring biodiversity: a hierarchical approach (Vol. 4). *Conservation Biology*.

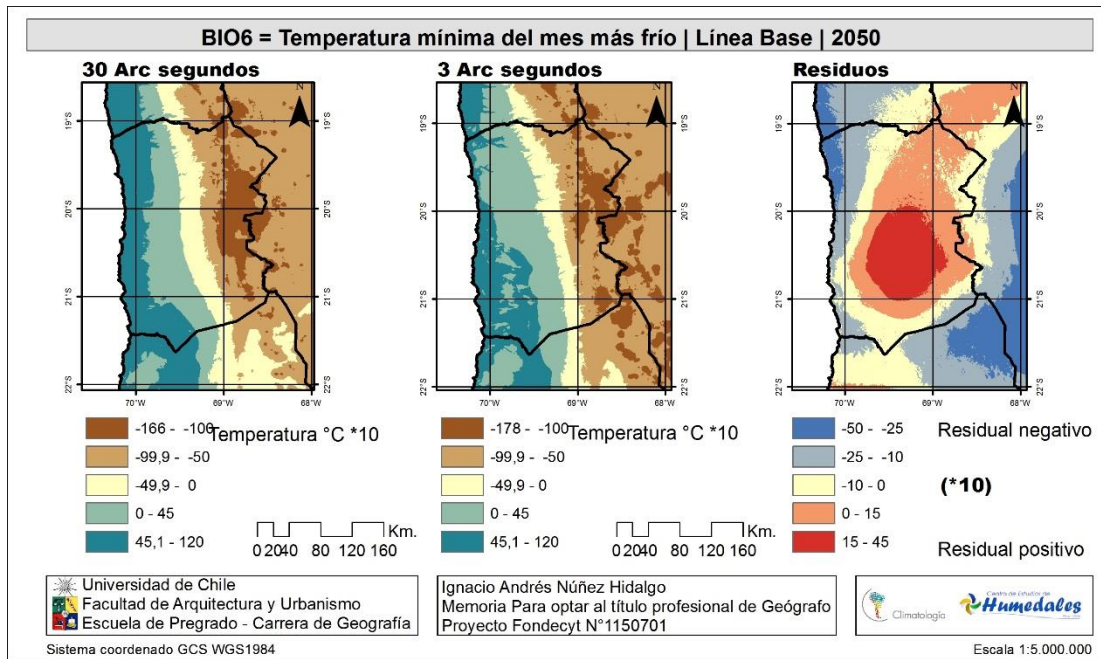
- ONU. (2015). Objetivos de Desarrollo del Milenio y Más Allá de 2015. Objetivo N°7: Garantizar la sostenibilidad del medio ambiente.: Organización de las Naciones Unidas.
- PEARSE, J., & BOYCE, M. (2006). Modelling Distribution and abundance with presence-only data (pp. 405-412). *Journal of applied Ecology*.
- PELLET, P., UGARTE, E., OSORIO, E., & HERRERA, F. (2005). Conservación de la biodiversidad en Chile, ¿legalmente suficiente? La necesidad de cartografiar la ley antes de decidir. Vol. 78. *Revista chilena de Historia Natural*.
- PETERSON, A. T., BALL, L. G., & COHOON, K. P. (2002). Predicting distributions of Mexican birds using ecological niche modelling methods.
- PETERSON, T., SOBERÓN, J., PEARSON, R., ANDERSON, R., MARTÍNEZ-MEYER, E., NAKAMURA, M., & ARAÚJO, M. (2011). Ecological Niches and Geographic Distributions.
- PEÑA-GOMEZ, F., GUERRERO, P., BIZAMA, G., DUARTE, M., & BUSTAMANTE, R. (2014). Climatic Niche Conservatism and Biogeographical Non-Equilibrium in *Eschscholzia californica* (Papaveraceae), an Invasive Plant in the Chilean Mediterranean Region.
- PHILLIPS, S. (2004). A Maximum Entropy Approach to Species Distribution Modeling.
- PHILLIPS, S., ANDERSON, R., & SCHAPIRE, R. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions.
- PINTO, L., HÉRAIL, G., & CHARRIER, R. (2004). Sedimentación sintectónica asociada a las estructuras neógenas en la Precordillera de la zona de Moquella, Tarapacá (19°15'S, norte de Chile).
- PLISCOFF, P., & FUENTES, T. (2008). Análisis de Representatividad Ecosistémica de las Áreas Protegidas Públicas y Privadas en Chile.
- PLISCOFF, P., & FUENTES, T. (2011). Modelación de la distribución de especies y ecosistemas en el tiempo y en el espacio: una revisión de las nuevas herramientas y enfoques disponibles. Vol. 48, pp. 61-79: *Revista de Geografía Norte Grande*.

- PLISCOFF, P., & LUEBERT, F. (2006). Una nueva propuesta de clasificación de la vegetación de Chile y su aplicación en la evaluación del estado de conservación de los ecosistemas terrestres.
- PLISCOFF, P., LUEBERT, F., HILGER, H., & GUIBAN, 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 Vol. 288, pp. 166-177. *Ecological Modelling*.
- PROOSDIJ, A., SOSEF, M., WIERINGA, J., & RAES, N. (2015). Minimum required number of specimen records to develop accurate species distribution models Vol. 38, pp. 01-11. *Ecography*.
- RAMSAR. (1994). Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional Especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas. Convención RAMSAR.
- RIVAS-MARÍNEZ, S., PENAS, A., LUENGO, M., & RIVAS-SÁENZ, S. (2003). Worldwide Bioclimatic Classification System: Backhuys Publishers, Leiden.
- ROMERO, H., & VINAGRE, J. (1985). Topoclimatología de la cuenca del río Mapocho. Vol. 32, pp. 3-30. *Revista Informaciones Geográficas*.
- RUSHTON, S., ORMEROD, S., & KERBY, G. (2004). New paradigms for modelling species distributions? Vol. 41, pp. 193–200. *Journal of Applied Ecology*.
- S., R., BALPLNG, Z., & JING, T. (2008). A Multivariate Regression Model for Predicting Precipitation in the Daqing Mountains. Vol. 28. *Mountain Research and Development*.
- SAG. (2009). Guía descriptiva de los sistemas vegetacionales azonales hídricos terrestres de la ecorregión altiplánica (SVAHT).
- SARRICOLEA, P. (2006). Análisis de la sustentabilidad del crecimiento urbano de la ciudad de Santiago y sus efectos sobre la configuración de las temperaturas superficiales. Tesis para optar al grado de Magíster en Geografía con mención en recursos territoriales, Universidad de Chile, Facultad De Arquitectura y Urbanismo, Santiago, Chile. Inédito.
- SARRICOLEA, P., & ROMERO, H. (2015). Variabilidad y cambios climáticos observados y esperados en el Altiplano del norte de Chile. Vol. 62, pp. 169-183. *Revista de Geografía Norte Grande*.

- SEYFRIED, H., WORNER, G., UHLIG, D., KOHLER, I., & CALVO, C. (1999). Introducción a la Geología y Morfología de los Andes en el Norte de Chile. Vol. 30, pp. 7-39. *Revista Chungrará*.
- SIMONETTI, J., VILLARROEL, P., SEPÚLVEDA, C., & TACÓN, A. (2005). Diversidad Biológica. GEO CHILE Informe País. Universidad de Chile, Instituto de Asuntos Públicos, Centro de Análisis de Políticas Públicas.
- SINCLAIR, S., WHITE, M., & NEWELL, G. (2010). How Useful Are Species Distribution Models for Managing Biodiversity under Future Climates? Vol. 15. *Ecology and Society*.
- SOBERÓN, J. (2007). Grinnellian and Eltonian niches and geographic distributions of species. Vol. 10, pp. 1115-1123. *Ecology letters*
- TANSLEY, A., G. (1935). The Use and Abuse of Vegetational Concepts and Terms. Vol. 16, pp. 284 - 307. *Ecology*.
- TILMAN, D. (2000). Causes, consequences and ethics of biodiversity. Vol. 405, pp. 208-211. *Nature Insight*.
- TNC. (2015). Our History: History & Milestones of The Nature Conservancy. Recurso Web: [en línea] < <http://www.nature.org/about-us/vision-mission/history/>>
- UICN. (2013). Acerca de la UICN. Recurso Web: [en línea] <[https://www.iucn.org/es/sobre/union/miembros es/acerca de la red iucn/](https://www.iucn.org/es/sobre/union/miembros/es/acerca_de_la_red_iucn/)>
- VALVERDE, A. (2012). Insights into the area under the receiver operating characteristic curve (AUC) as a discrimination measure in species distribution modelling Vol. 21, pp. 498–507. *Global Ecology and Biogeography*.
- VILLAGRÁN, C., & HINOJOSA, L.-F. (2005). Esquema Biogeográfico de Chile. (pp. 577): Ediciones de la Universidad Nacional Autónoma de México, Jiménez Editores, México.
- WALTER, B.-S. (2002). Walter's Vegetation of the Earth. The Ecological Systems of the Geo-Biosphere: Introduction and Remarks.
- WAYNE, G. (2013). The Beginner's Guide to Representative Concentration Pathways.

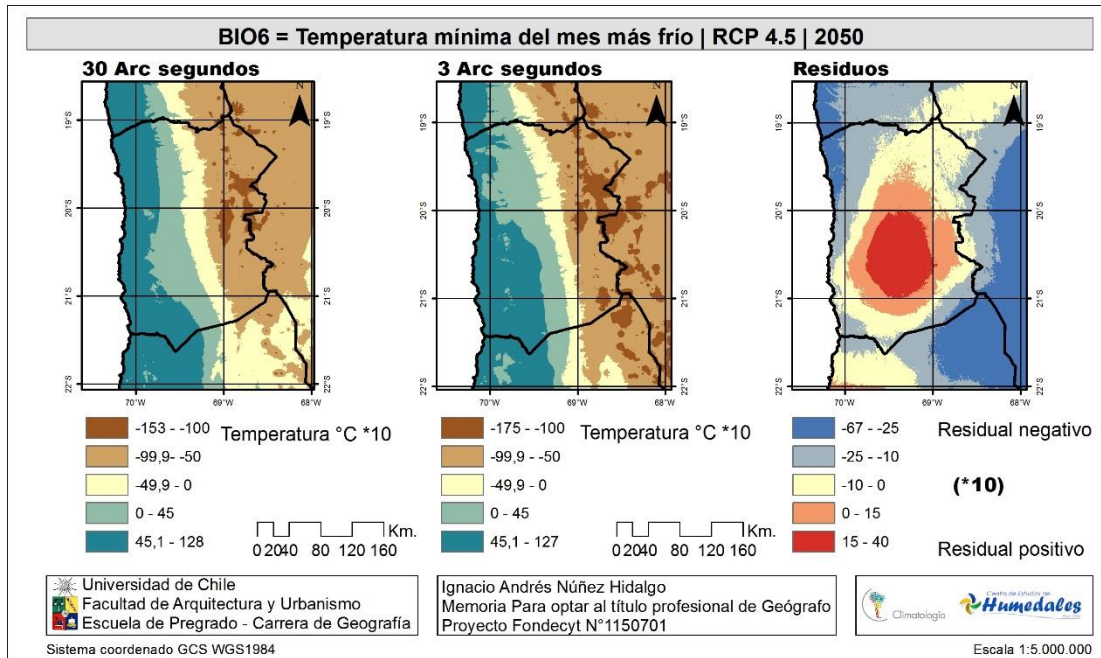
- WIENS, J., STRALBERGA, D., JONGSOMJITA, D., HOWELL, C., & SNYDERB, M. (2009). Niches, models, and climate change: Assessing the assumptions and uncertainties.
- WILBY, R., & DAWSON, C. (2007). SDSM 4.2 — A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts: User Manual.
- WILBY, R., DAWSON, C., & BARROW, E. (2002). SDSM — a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts.
- WISZ, M., HIJMANS, R., LI, J., PETERSON, A., GRAHAM, C., & GUISAN, A. (2008). Effects of sample size on the performance of species distribution models (Vol. 14, pp. 763–773). *Diversity and Distributions*.
- WOODWARD, F. (1987). Climate and plant distribution: Cambridge University Press, Cambridge.
- WWF. (2015). Que Hacemos en Chile. Recurso Web: [en línea] < http://www.wwf.cl/que_hacemos/ >
- ZAMORA, A. (2013). Primera Reconstrucción paleoclimática cuantitativa: del polen de madriguera al clima del pasado en un transecto altitudinal del Altiplano de Chile, Pozo Almonte-salar del Huasco. Región de Tarapacá. Memoria para optar al título profesional de Geógrafo, Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Santiago, Chile. Inédito.
- ZIMMERMANN, N. (2010). Motive D2.2. Climate and Land Use Data. Swiss Federal Research Institute WSL.
- ZIMMERMANN, N., EDWARDS-JR, T., MOISEN, G., FRESCINO, T., & BLACKARD, J. (2007). Remote sensing-based predictors improve distribution models of rare, early successional and broadleaf tree species in Utah. Vol. 44, pp. 1057–1067. *Journal of Applied Ecology*.
- ZIMMERMANN, N., PEARMAN, P., & SVENNING, J., C. (2010). New Trends in species distribution modelling. *Ecography*.
- ZIMMERMANN, N., SCHMATZ, D., MEIER, E., DOBBERTIN, M., PEARMAN, P., THURIG, E. . . . KIENAST, F. (2014). PORTREE Final Report: A project funded by the BAFU---WSL program on “Forests and Climate Change” in Switzerland.

9. Anexos



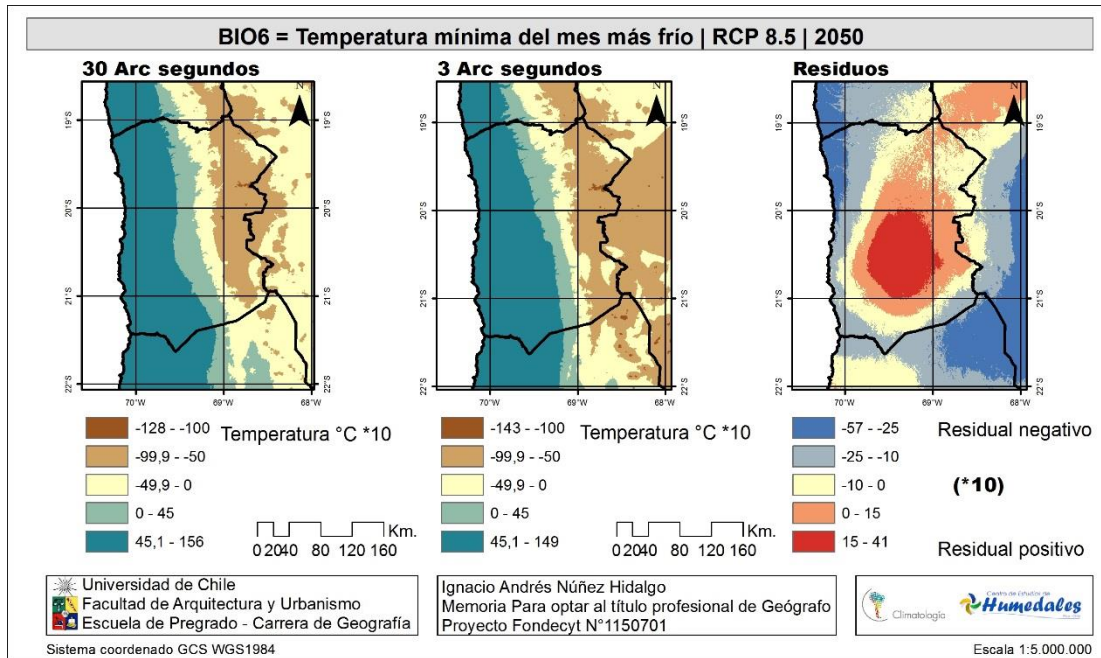
Anexo N° 1: Cartografía de residuos para la línea base de la variable BIO6. Fuente: Elaboración propia

“Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de Cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y Modelos de Circulación Global de muy, muy alta resolución”.



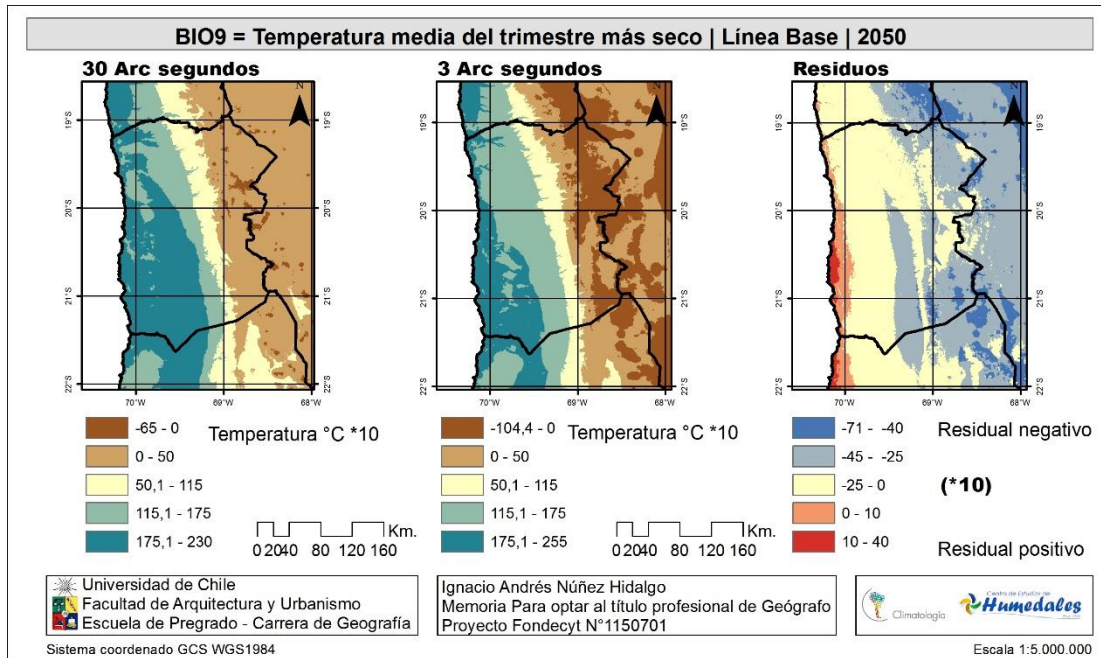
Anexo N° 2: Cartografía de residuos para el escenario RCP 4.5 de la variable BIO6.
Fuente: Elaboración propia.

“Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de Cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y Modelos de Circulación Global de muy, muy alta resolución”.



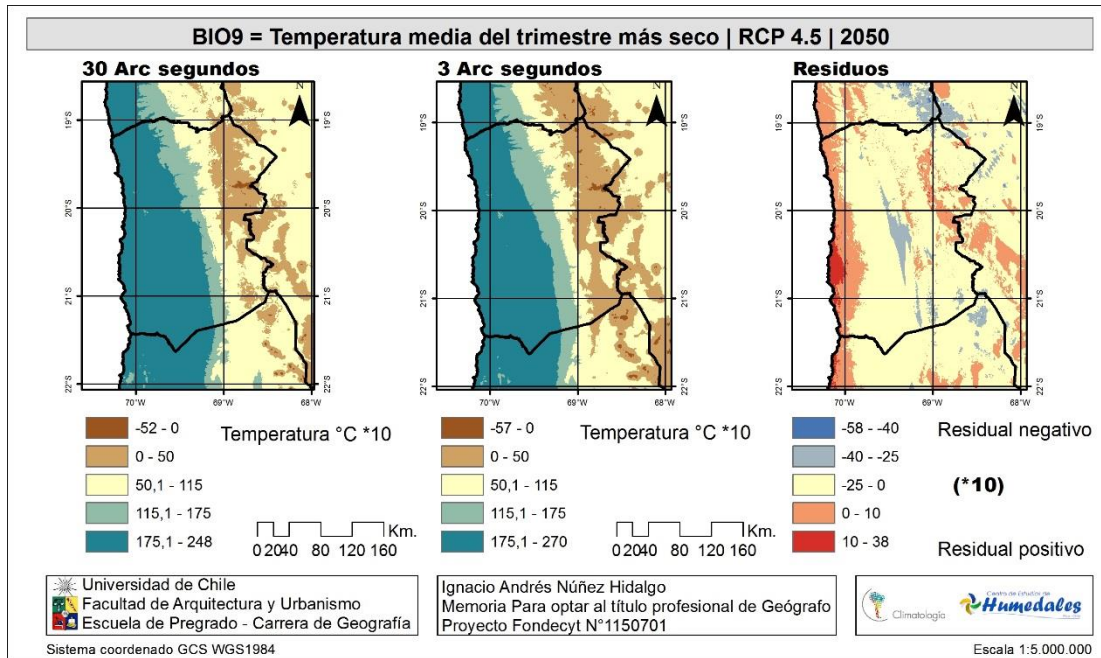
Anexo N° 3: Cartografía de residuos para el escenario RCP 8.5 de la variable BIO6.
Fuente: Elaboración propia.

“Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de Cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y Modelos de Circulación Global de muy, muy alta resolución”.



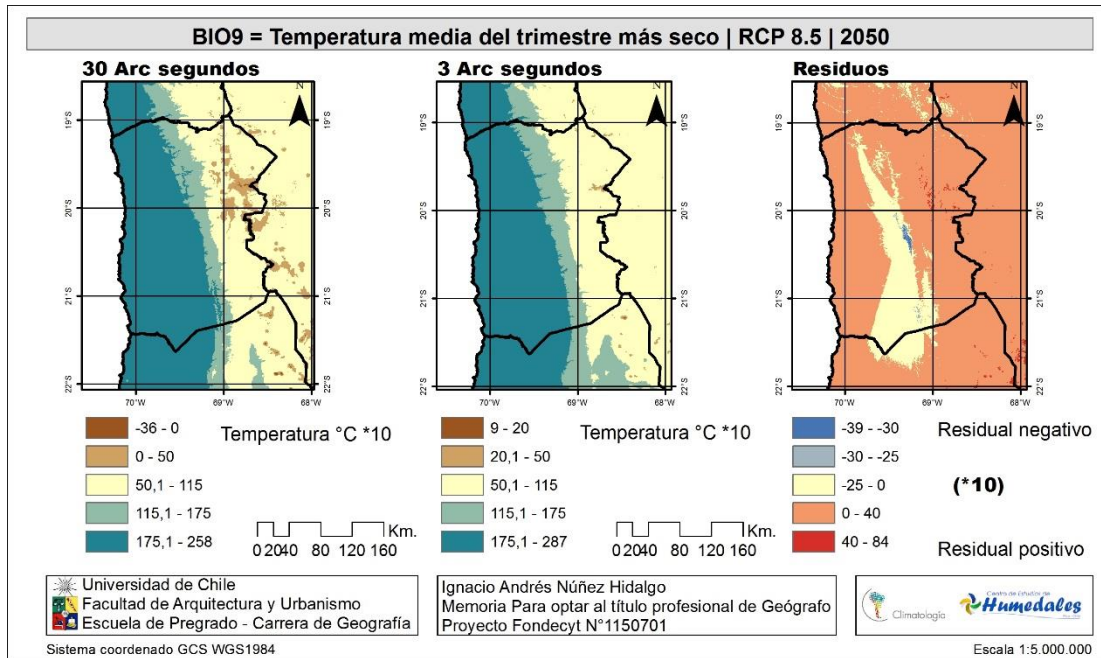
Anexo N° 4: Cartografía de residuos para la línea base de la variable BIO9. Fuente: Elaboración propia.

“Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de Cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y Modelos de Circulación Global de muy, muy alta resolución”.



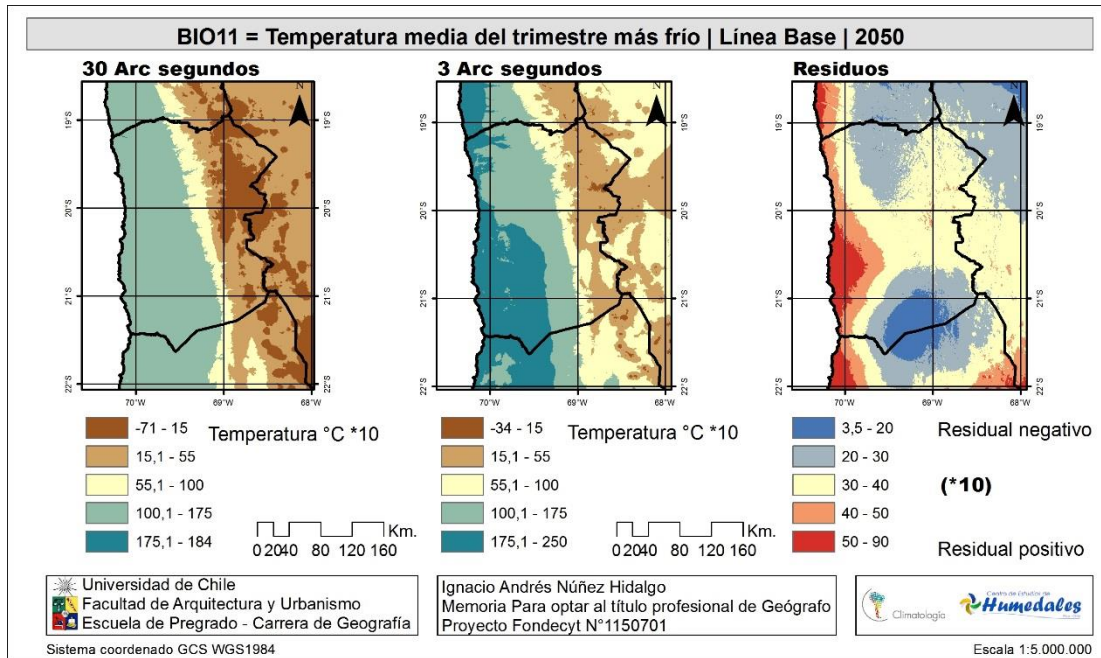
Anexo N° 5: Cartografía de residuos para el escenario RCP 4.5 de la variable BIO9.
Fuente: Elaboración propia

“Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de Cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y Modelos de Circulación Global de muy, muy alta resolución”.



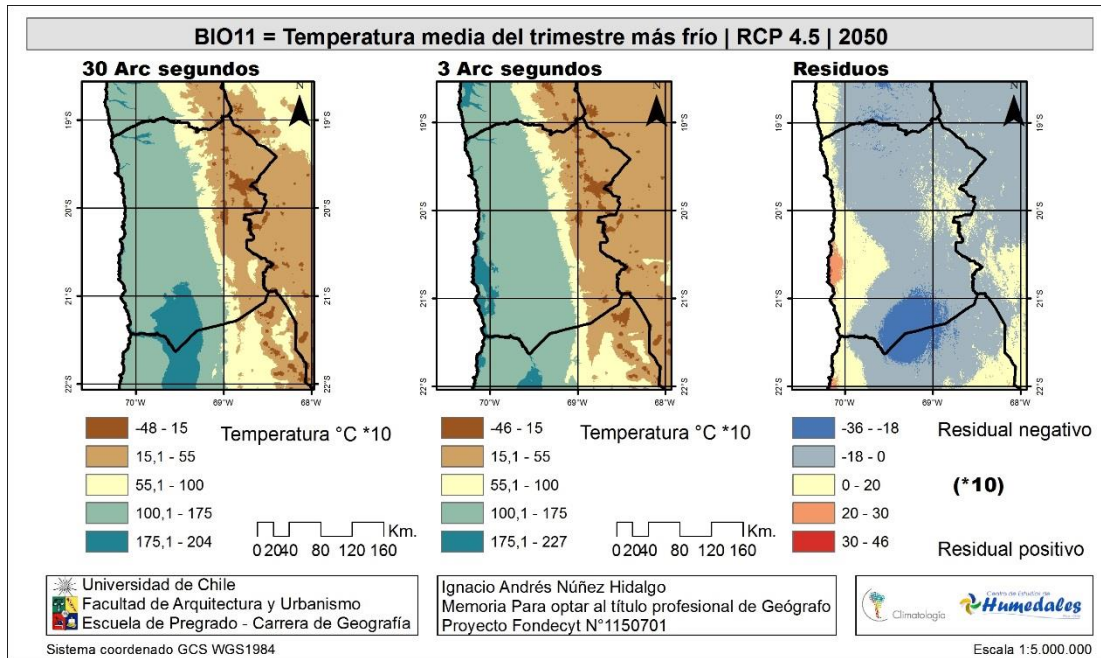
Anexo N° 6: Cartografía de residuos para el escenario RCP 8.5 de la variable BIO9.
Fuente: Elaboración propia.

“Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de Cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y Modelos de Circulación Global de muy, muy alta resolución”.



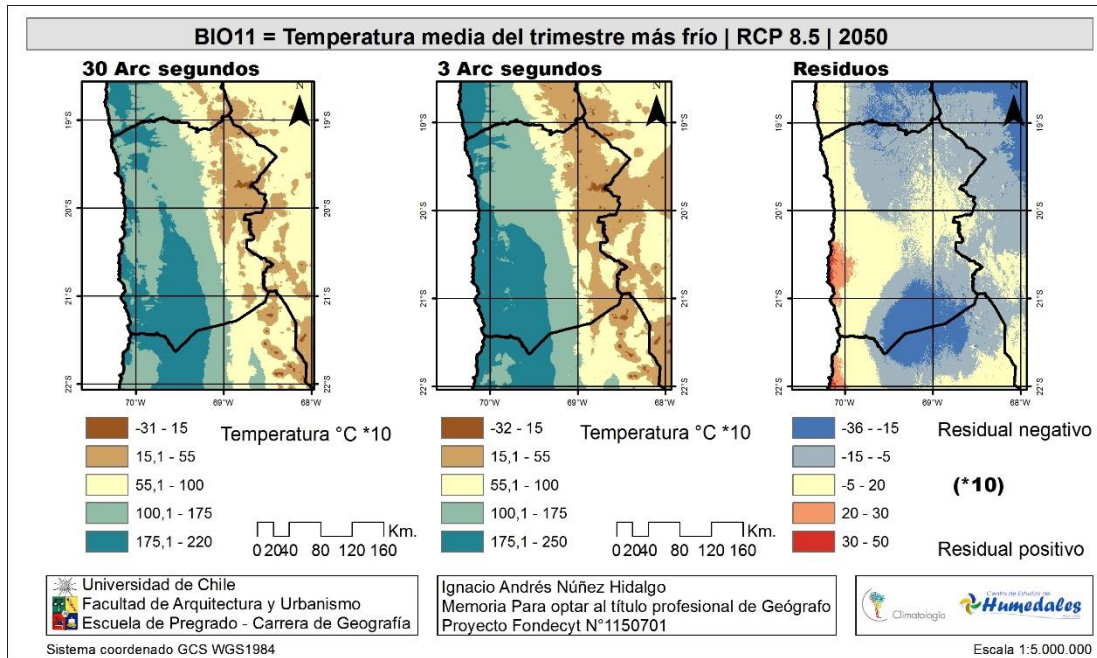
Anexo N° 7: Cartografía de residuos para la línea base de la variable BIO11. Fuente: Elaboración propia.

“Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de Cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y Modelos de Circulación Global de muy, muy alta resolución”.



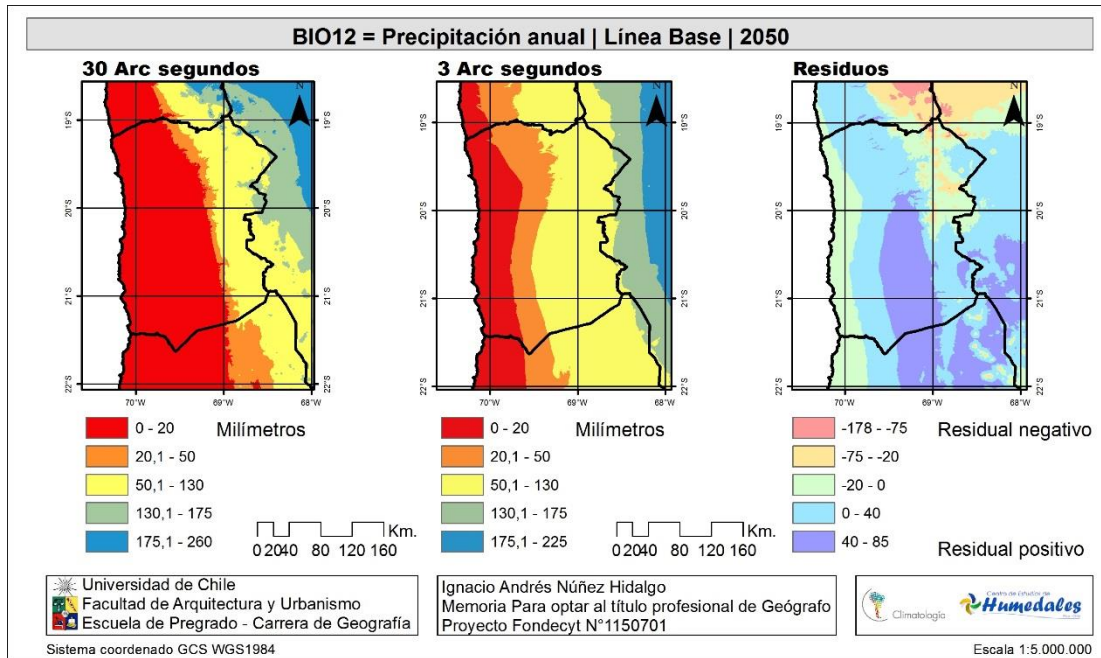
Anexo N° 8: Cartografía de residuos para el escenario RCP 4.5 de la variable BIO11.
Fuente: Elaboración propia.

“Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de Cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y Modelos de Circulación Global de muy, muy alta resolución”.



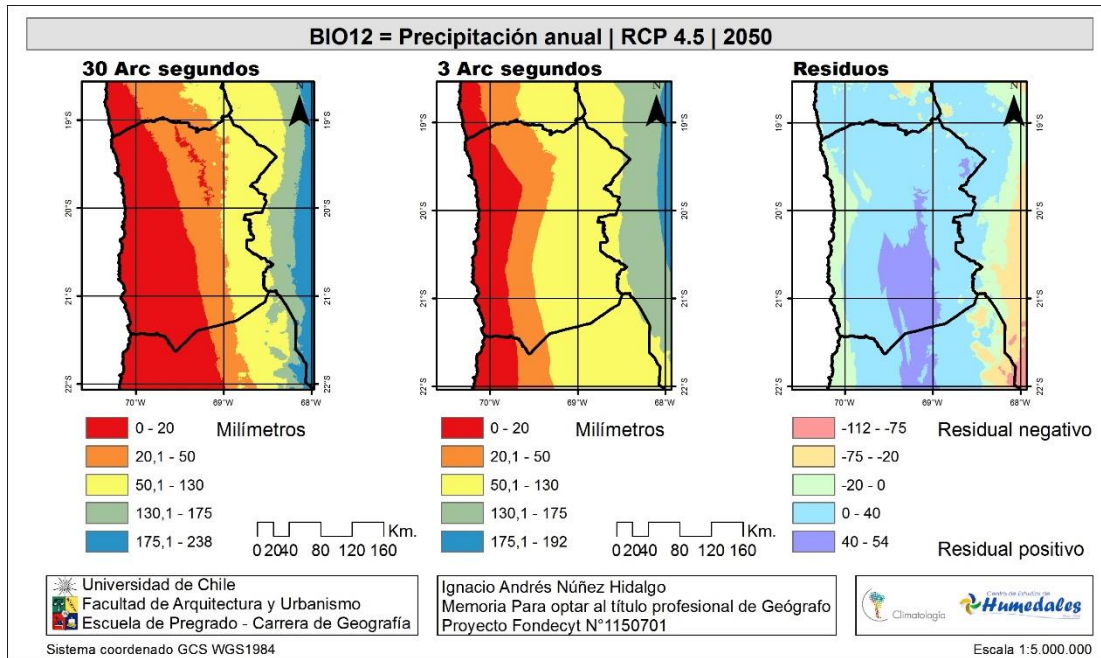
Anexo N° 9: Cartografía de residuos para el escenario RCP 8.5 de la variable BIO11.
Fuente: Elaboración propia.

“Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de Cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y Modelos de Circulación Global de muy, muy alta resolución”.



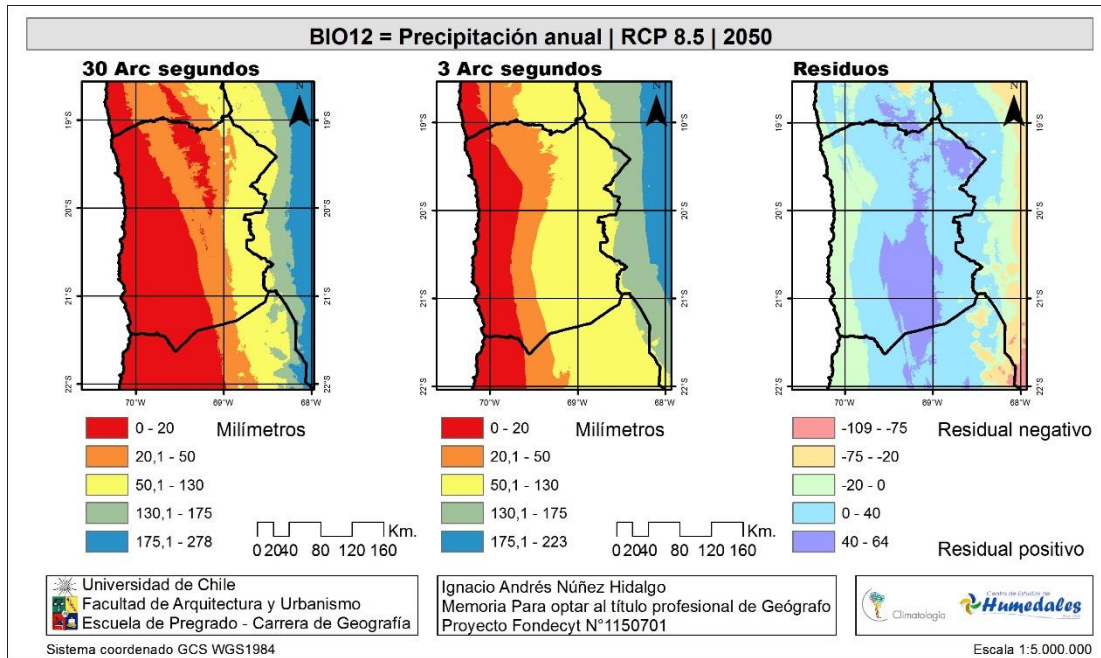
Anexo N° 10: Cartografía de residuos para la línea base de la variable BIO12. Fuente: Elaboración propia.

“Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de Cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y Modelos de Circulación Global de muy, muy alta resolución”.



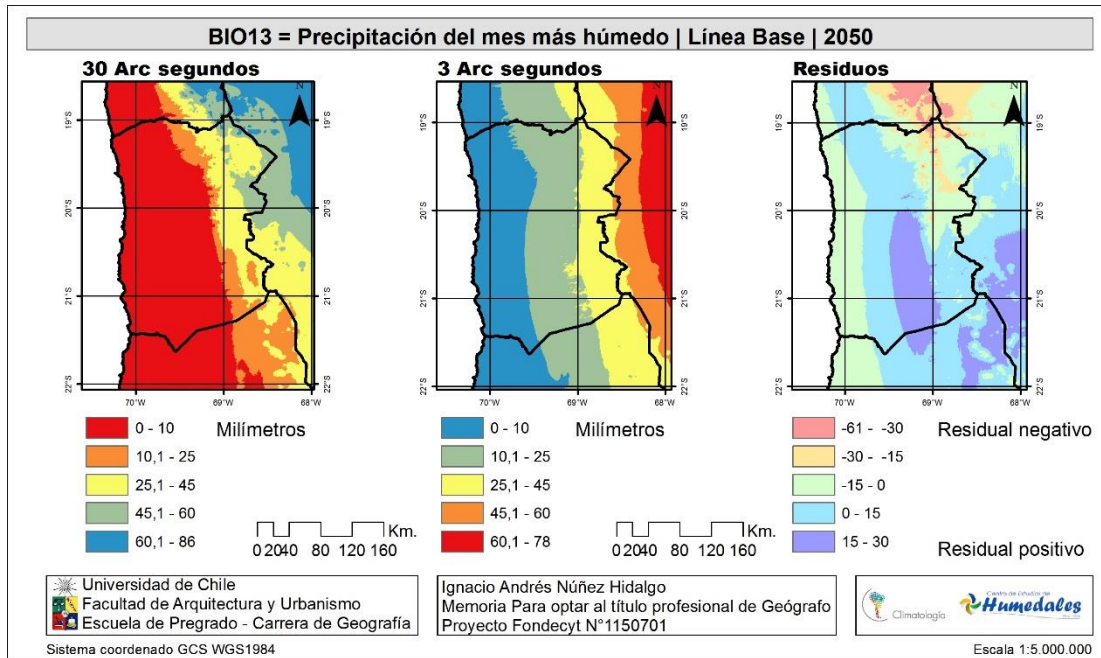
Anexo N° 11: Cartografía de residuos para el escenario RCP 4.5 de la variable BIO12.
Fuente: Elaboración propia.

“Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de Cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y Modelos de Circulación Global de muy, muy alta resolución”.



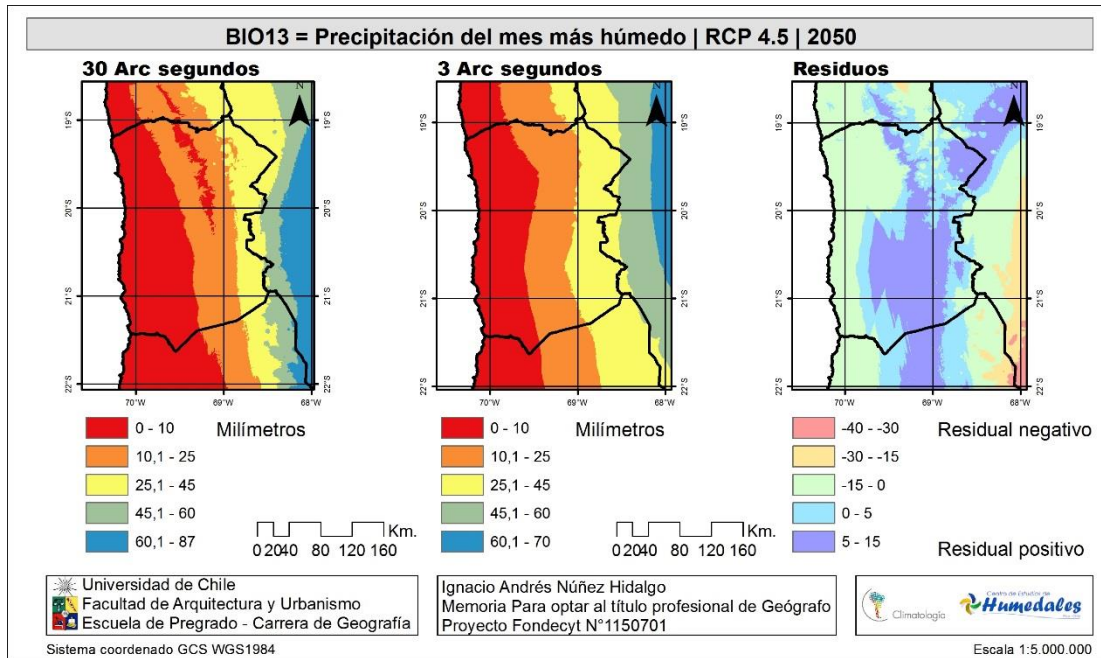
Anexo N° 12: Cartografía de residuos para el escenario RCP 8.5 de la variable BIO12.
Fuente: Elaboración propia.

“Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de Cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y Modelos de Circulación Global de muy, muy alta resolución”.



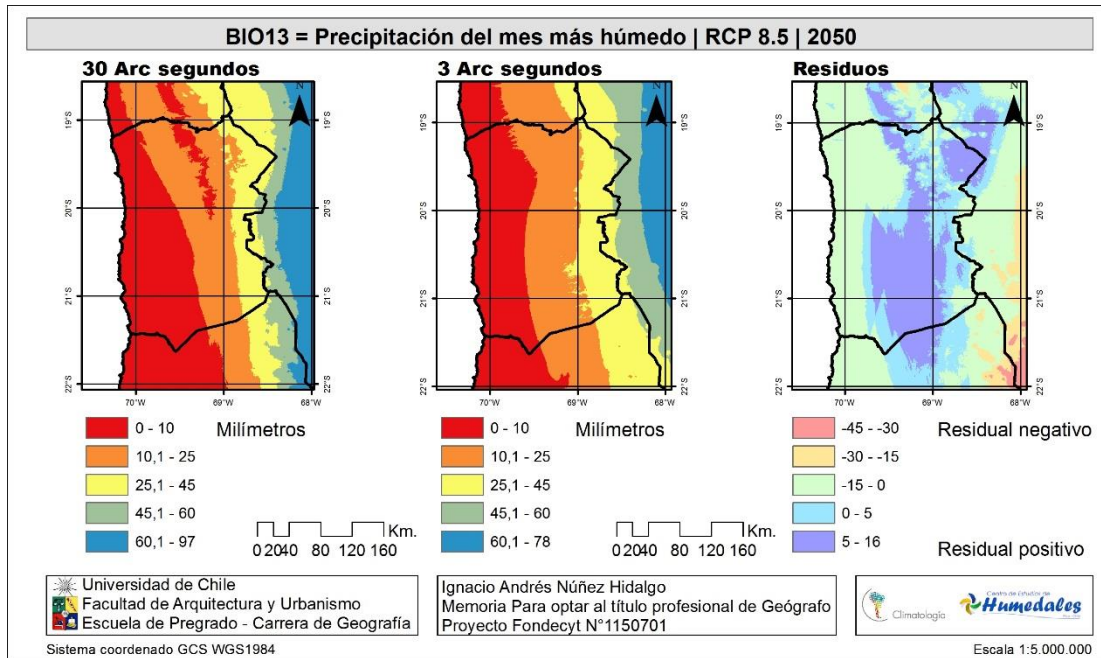
Anexo N° 13: Cartografía de residuos para la línea base de la variable BIO13. Fuente: Elaboración propia.

“Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de Cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y Modelos de Circulación Global de muy, muy alta resolución”.



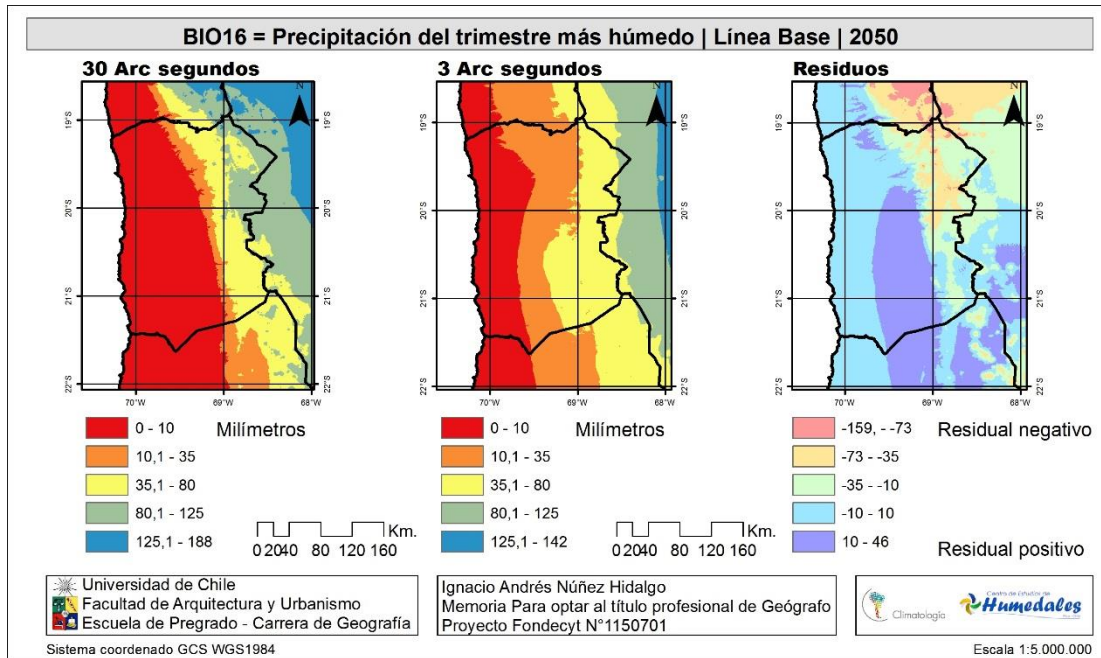
Anexo N° 14: Cartografía de residuos para el escenario RCP 4.5 BIO13. Fuente: Elaboración propia.

“Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de Cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y Modelos de Circulación Global de muy, muy alta resolución”.



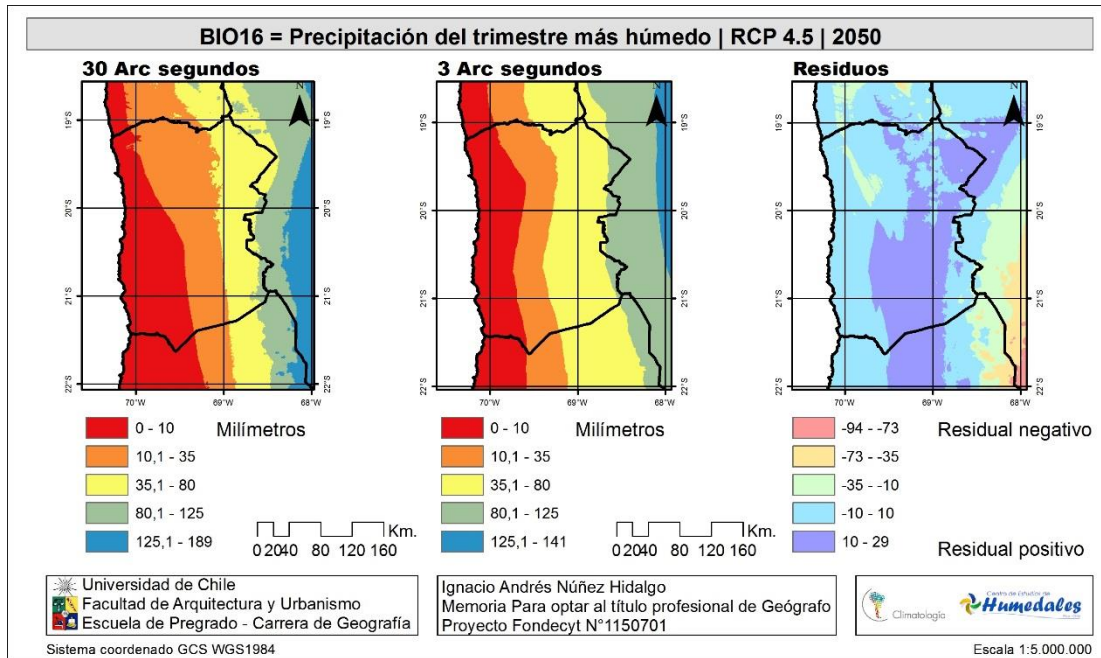
Anexo N° 15: Cartografía de residuos para el escenario RCP 8.5 BIO13. Fuente: Elaboración propia.

“Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de Cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y Modelos de Circulación Global de muy, muy alta resolución”.



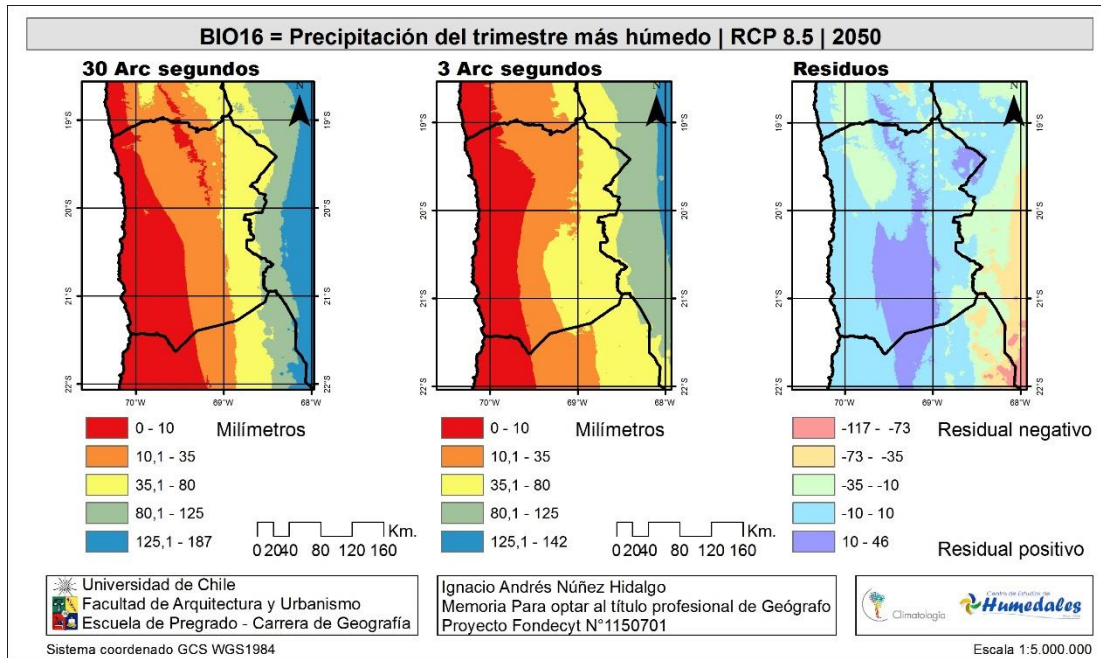
Anexo N° 16: Cartografía de residuos para la línea base de la variable BIO16. Fuente: Elaboración propia.

“Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de Cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y Modelos de Circulación Global de muy, muy alta resolución”.



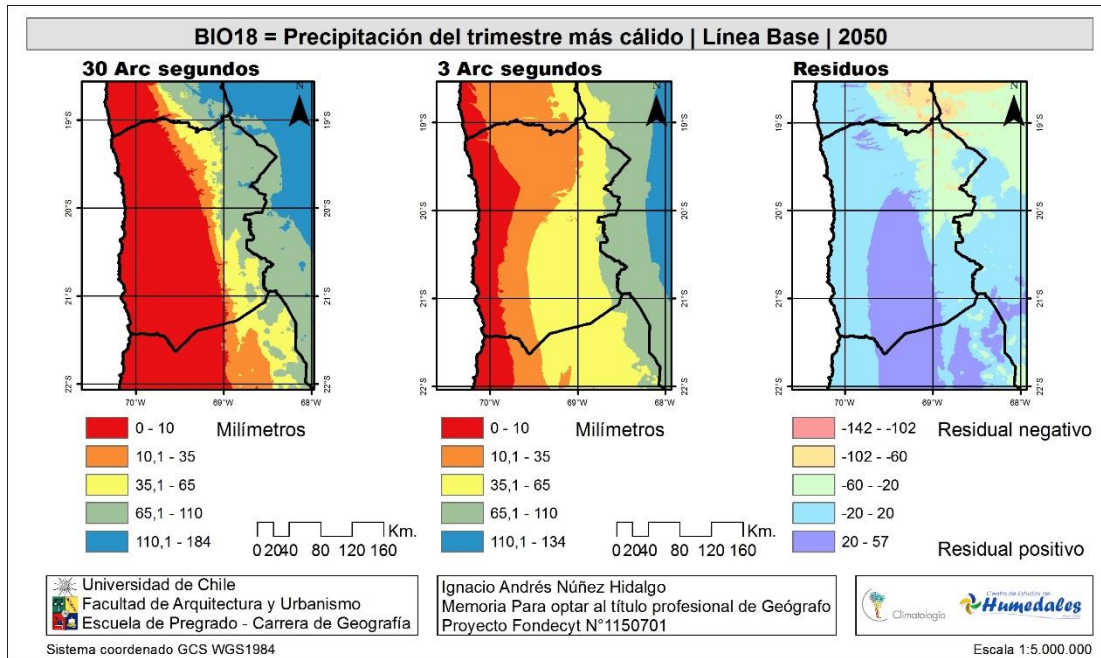
Anexo N° 17: Cartografía de residuos para el escenario RCP 4.5 BIO16. Fuente: Elaboración propia.

“Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de Cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y Modelos de Circulación Global de muy, muy alta resolución”.



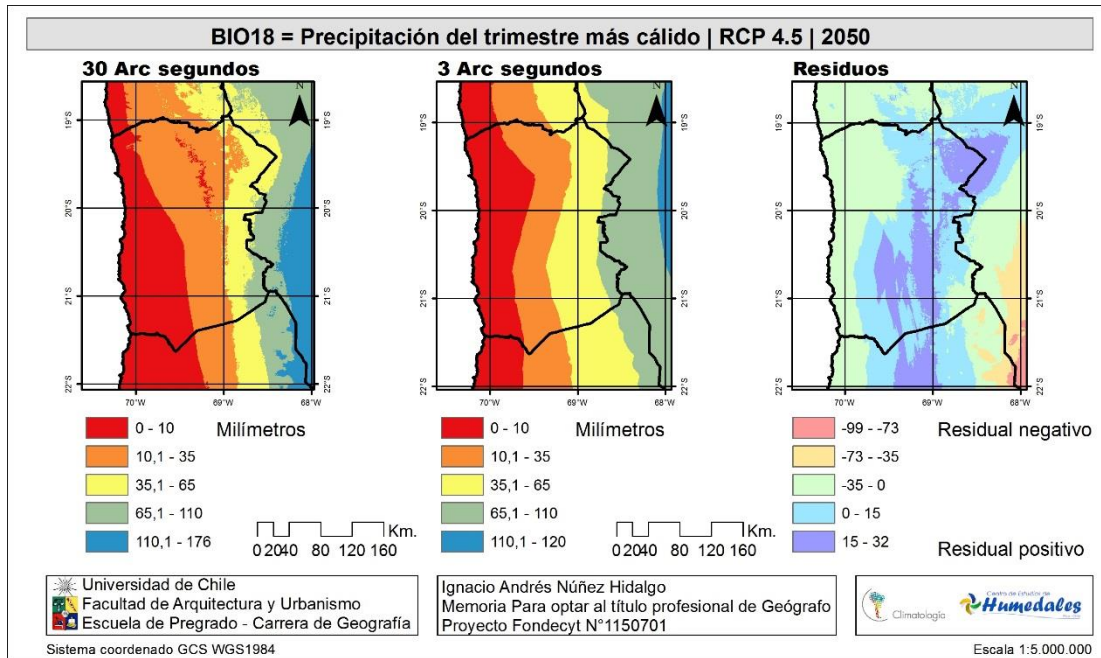
Anexo N° 18: Cartografía de residuos para el escenario RCP 8.5 BIO16. Fuente: Elaboración propia.

“Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de Cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y Modelos de Circulación Global de muy, muy alta resolución”.



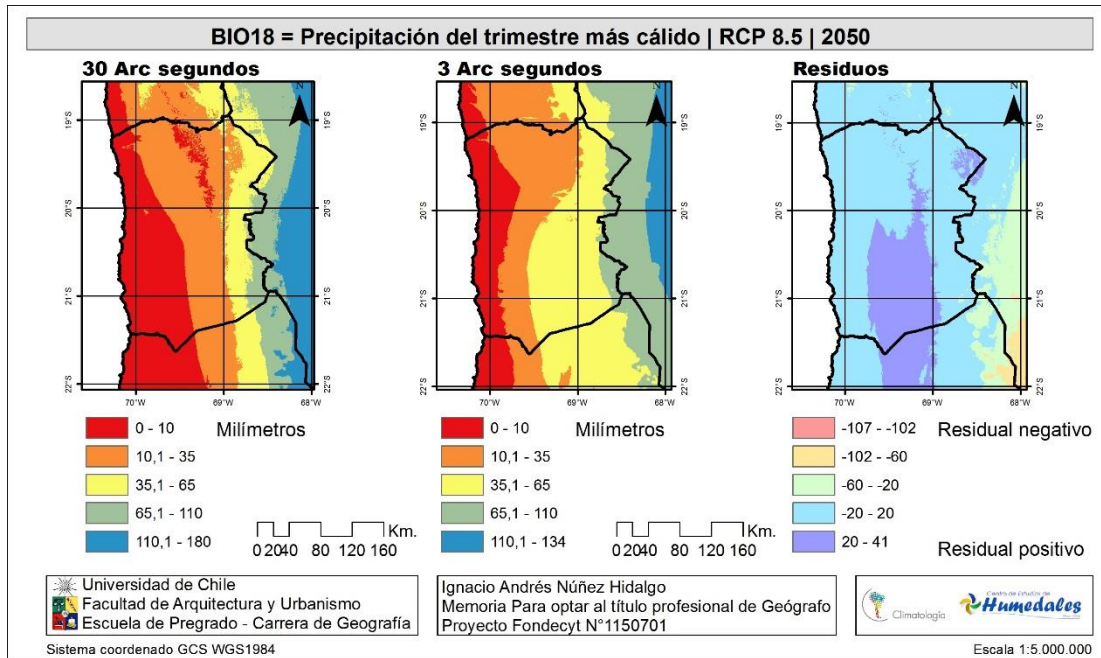
Anexo N° 19: Cartografía de residuos para la línea base de la variable BIO18. Fuente: Elaboración propia

“Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de Cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y Modelos de Circulación Global de muy, muy alta resolución”.



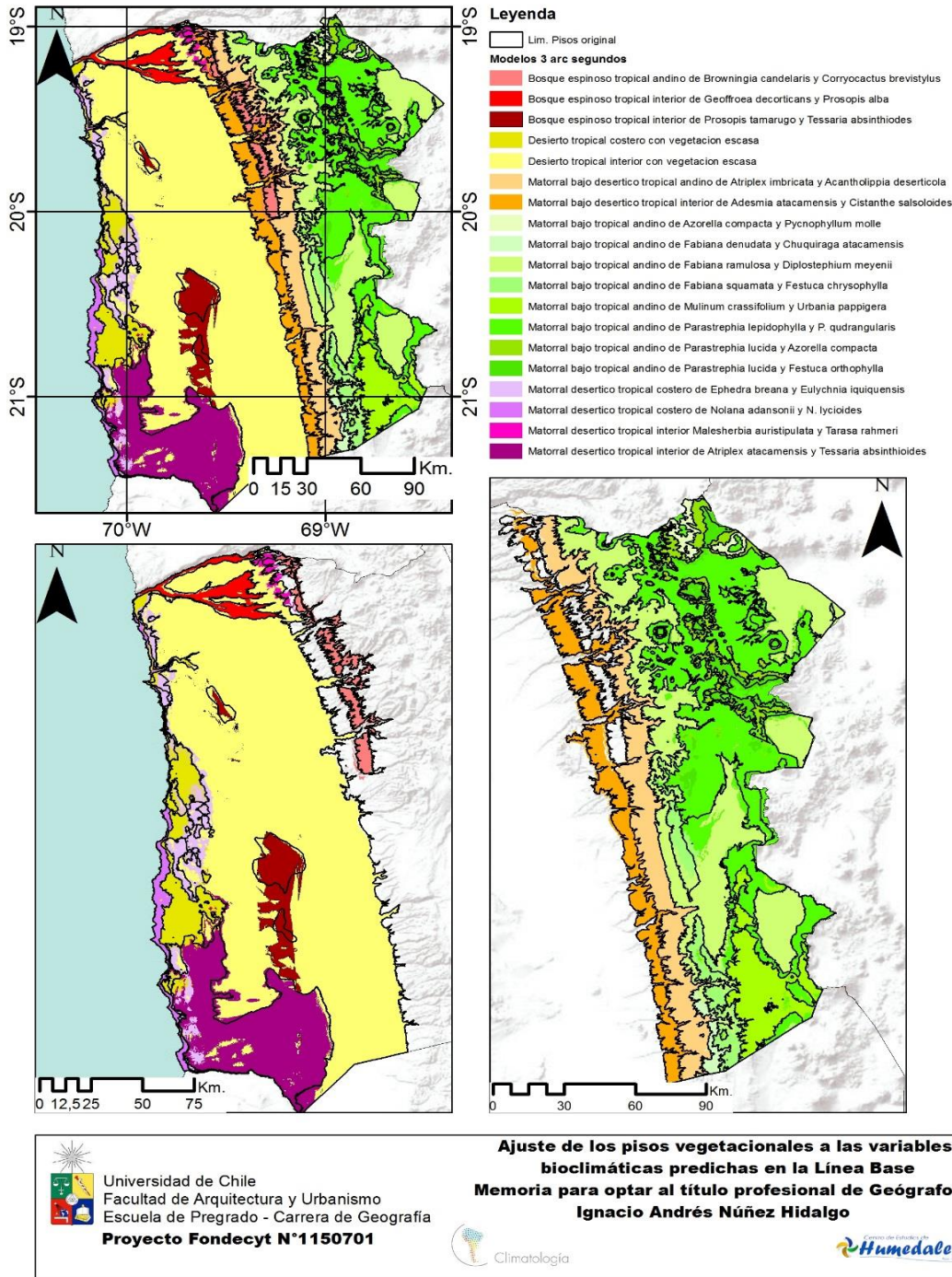
Anexo N° 20: Cartografía de residuos para el escenario RCP 4.5 BIO18. Fuente: Elaboración propia

“Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de Cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y Modelos de Circulación Global de muy, muy alta resolución”.



Anexo N° 21: Cartografía de residuos para el escenario RCP 8.5 BIO18. Fuente: Elaboración propia

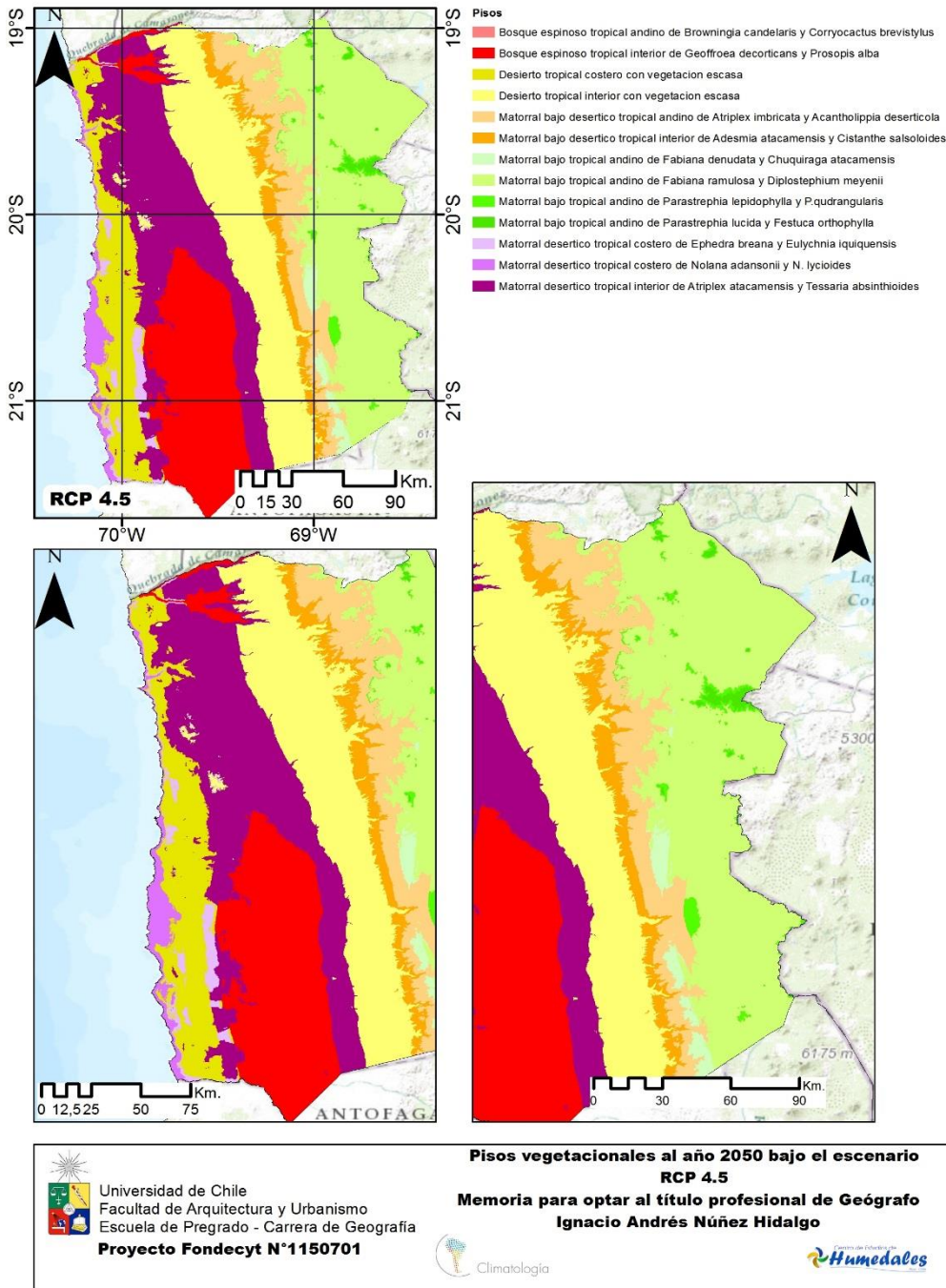
“Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de Cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y Modelos de Circulación Global de muy, muy alta resolución”.



Anexo

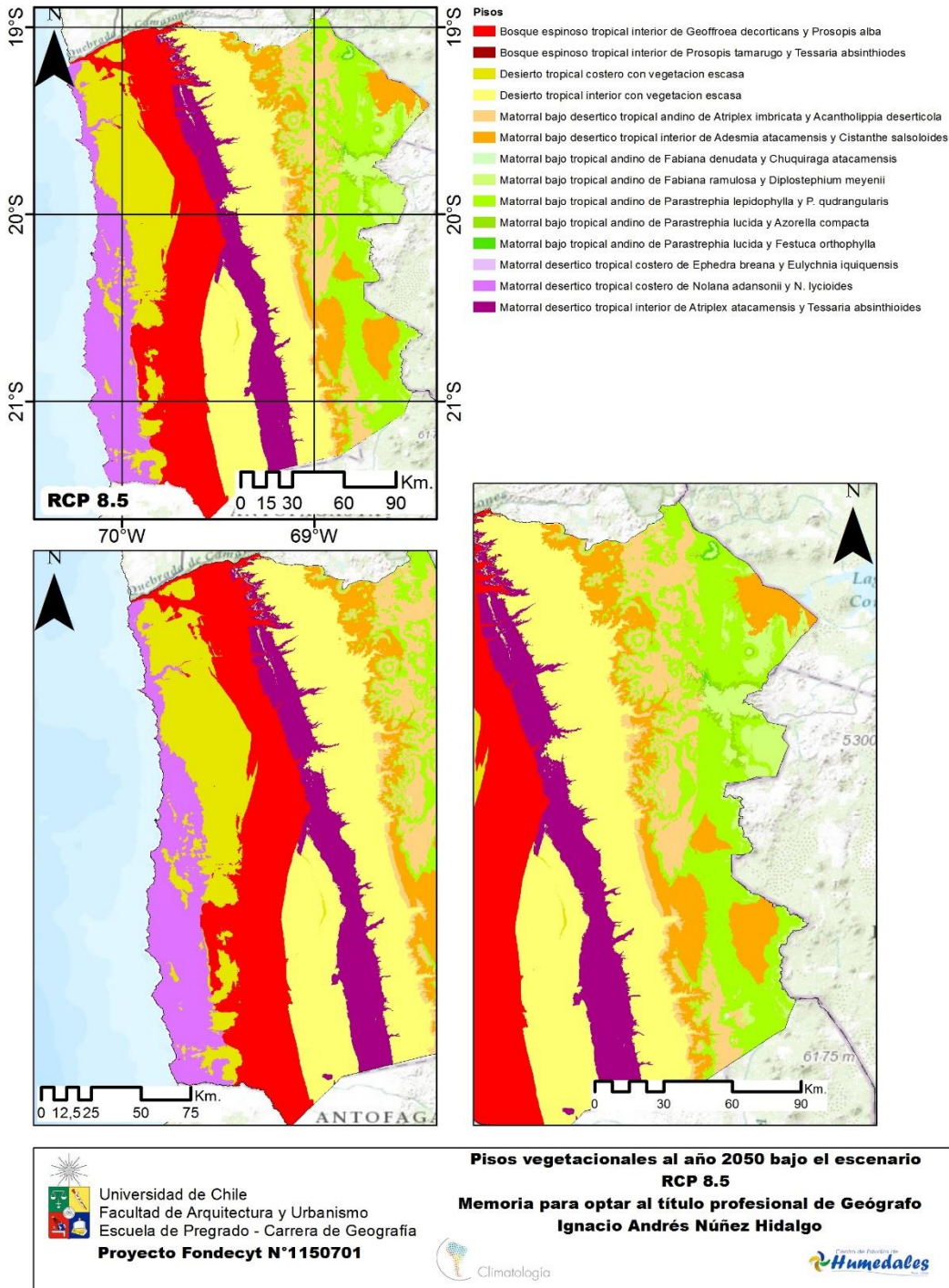
N° 22: Cartografía de ajuste de los pisos vegetales a las variables bioclimáticas predichas a 3 arc segundos en la línea base. Fuente: Elaboración propia.

“Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de Cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y Modelos de Circulación Global de muy, muy alta resolución”.



Anexo N° 23: Proyección de los pisos vegetales a las variables bioclimáticas predichas a 3 arc segundos en el escenario RCP 4.5. Fuente: Elaboración propia.

“Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de Cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y Modelos de Circulación Global de muy, muy alta resolución”.



Anexo N° 24: Proyección de los pisos vegetales a las variables bioclimáticas predichas a 3 arc segundos en el escenario RCP 8.5 Fuente: Elaboración propia.