

UCH-FC
MAB-EBE
6516

Efectos del cambio climático y la dispersión sobre la distribución

C.1

potencial de las especies del género

***Montiopsis* (Montiaceae)**



Tesis

entregada a la Universidad de Chile

en el cumplimiento parcial de los requisitos para optar al grado de

Magíster en Ciencias Biológicas con mención en

Ecología y Biología Evolutiva

Facultad de Ciencias

por

Paula Alexandra Giraldo Ramírez

Director de Tesis:

Dra. Mary Kalin Arroyo

Santiago, Abril 2012

FACULTAD DE CIENCIAS

UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS
UNIVERSIDAD DE CHILE
INFORME DE APROBACIÓN
TESIS DE MAGISTER

Se informa a la Escuela de Postgrado de la Facultad de Ciencias, que la Tesis de Magíster presentada por el candidato

PAULA ALEXANDRA GIRALDO RAMÍREZ

Ha sido aprobada por la comisión de evaluación de la tesis como requisito para optar al grado de Magíster en Ciencias Biológicas con mención en Ecología y Biología Evolutiva, en el examen de defensa privada de tesis rendido el día 13 de diciembre de 2011.

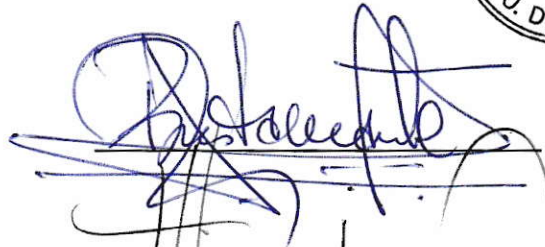
Director de Tesis:

Dra. Mary Kalin Arroyo

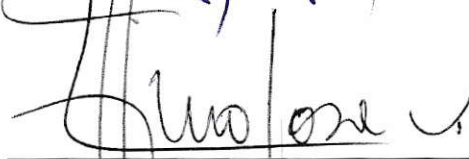


Comisión de evaluación de la tesis:

Dr. Ramiro Bustamante



Dr. Felipe Hinojosa



AGRADECIMIENTOS



Quiero agradecer a mis padres y hermanos por su apoyo y cariño incondicional. A mi esposo por compartir conmigo esta experiencia y apoyarme en todo este camino.

A mi tutora Mary Kalin por sus enseñanzas, apoyo y comprensión en los momentos difíciles.

A Ramiro Bustamante y a Felipe Hinojosa por sus aportes y sugerencias.

A Donna Ford por permitirme usar los datos de ocurrencias de su tesis y compartir su base de datos de *Montiopsis*.

A Patricio Pliscoff por su paciencia y disposición para responder todas mis preguntas y enseñarme de modelos.

A Matt Ogburn por permitirme usar sus fotos de *Montiopsis* y compartir su experiencia e información.

A Paola Jara por darme toda su ayuda y compartir su experiencia en este trabajo de tesis, por las risas y la compañía. A Romina por todos los favores y cariño.

A Leonor y Daniel por brindarme su apoyo.

A todos aquellos que de alguna u otra manera compartieron conmigo durante esta experiencia.

A la Beca Magister Latinoamericano Conicyt y a los fondos de: ICM P05-002, PBF-23 por la financiación de este proyecto.

ÍNDICE

Resumen	vi
Abstract	vii
Introducción	1
Hipótesis	11
Objetivos	12
Materiales y Métodos	13
Resultados	23
Discusión	39
Conclusiones	44
Referencias	46



LISTA DE TABLAS



Tabla 1.Registros usados en el entrenamiento de los modelos construidos con Maxent para las 18 especies del género <i>Montiopsis</i>	16
Tabla 2.Variables bioclimáticas derivadas de la temperatura mensual y valores de precipitación obtenidas de Worldclim	17
Tabla 3. Distancias de dispersión estimadas, obtenidas a partir de la regresión de las distancias de dispersión vs. el largo del tallo para las 18 especies del género <i>Montiopsis</i> .	30
Tabla 4. Proporción de cambio en las áreas de distribución potencial entre los escenarios climáticos actual-B2 y actual-A2, para los subgéneros <i>Montiopsis</i> y <i>Dianthoideae</i> .	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Área total de distribución del género <i>Montiopsis</i> en el sur de Perú, sur de Bolivia, Chile y Argentina.	15
Figura 2. Árbol filogenético de Inferencia Bayesiana, basado en secuencias de rDNA de la región ITS, para 18 especies del género <i>Montiopsis</i> (Montiaceae).	24
Figura 3. Curvas de dispersión de semillas en cuatro especies de <i>Montiopsis</i>	28
Figura 4.Regresión de el largo del tallo vs. las distancias de dispersión para cuatro especies del género <i>Montiopsis</i> .	29
Figura 5. Diferencia en desplazamiento latitudinal (Km) de los centroides de las distribuciones para las 18 especies en los escenarios futuros B2 y A2.	31
Figura 6. Desplazamiento altitudinal (m) de las distribuciones para las 18 especies en los tres escenarios climáticos (Media+/-DE).	32
Figura 7. Proporciones de cambio en el área de distribución entre los escenarios Actual-B2 y Actual-A2 para las especies subandinas (A) y las especies andinas (B), en un escenario de dispersión ilimitada.	34
Figura 8.Proporciones de cambio en el área de distribución entre los escenarios actual-B2 y actual-A2 para las especies subandinas (A) y las	36

especies andinas (B) en un escenario de dispersión estimada.



ANEXOS

Anexo 1. Fotografías de algunas especies de <i>Montiopsis</i>	55
Anexo 2. Mapas de distribución potencial actual y futura de las especies del género <i>Montiopsis</i> .	57

RESUMEN



Se prevé que la distribución de las especies podría cambiar como consecuencia del cambio climático. Por lo cual, predecir estos posibles cambios, considerando la capacidad de dispersión de especies emparentadas de plantas, será fundamental para tomar decisiones de manejo y conservación tanto de las especies como de su historia evolutiva. El objetivo de este trabajo fue evaluar la distribución potencial de las especies y de los grupos monofiléticos al interior del género *Montiopsis* bajo cambio climático, considerando su capacidad de dispersión. Los modelos de distribución potencial se obtuvieron usando las variables climáticas del modelo Worldclim (1km) para los escenarios climáticos futuros B2 y A2 y registros de presencia de las especies. Los resultados muestran que el género *Montiopsis* experimentaría limitaciones para dispersarse hasta los hábitats potenciales futuros bajo escenarios de cambio climático debido a su limitada capacidad de dispersión. Las especies del subgénero *Dianthoideae* y *Montiposismostraron* una disminución en su distribución; sin embargo el subgénero *Montiopsis* mostró una mayor disminución que el subgénero *Dianthoideae*. Estos resultados muestran que los potenciales efectos negativos del cambio climático podrían ser aún peores con una baja capacidad de dispersión, causando una posible disminución de la diversidad de especies y la historia evolutiva en áreas de gran diversidad y alto número de endemismos.

ABSTRACT

Species distribution would change as a consequence of climate change. Consequently, predictions about species distribution, which considering the dispersal ability of related plant species, will be fundamental to take management and conservation decision to both species and their evolutionary history. Our aim was to evaluate the potential effects of climate change on the potential future distribution of both the species and the two monophyletic groups within the genus *Montiopsis*, considering their dispersal capacity. Patterns of potential current and future distribution were obtained using climatic variables of the Worldclim model (1km) to the future climate scenarios A2 and B2 and records of species presence. Dispersal distances of the genus were calculated by laboratory test using four species. The results show that the genus *Montiopsis* could not disperse to all potential future habitats because of their dispersal capacity. Species of the subgenus *Dianthoideae* and *Montiopsis* showed a decrease in their potential distribution; nevertheless, subgenus *Montiopsis* show a bigger decrease than subgenus *Dianthoidea*. These results show potential negative effect of climate change could be worst to species with low dispersal ability, decreasing the species diversity and the evolutionary history in high diversity areas with high number of endemic species.

INTRODUCCIÓN

El principal objetivo a través de la historia de la ecología ha sido entender los factores que determinan la distribución y abundancia de las especies. La distribución de una especie es una expresión compleja de su ecología e historia evolutiva operando con diferentes intensidades a diferentes escalas (Brown et al. 1996, Pearson y Dawson 2003), donde las áreas geográficas que ocupan son determinadas en gran medida por cuatro factores: 1). *Condiciones abióticas* (aspectos de clima, ambiente físico, condiciones edáficas) que imponen límites fisiológicos sobre la capacidad de las especies para persistir en un área determinada; 2). *Factores bióticos* (interacciones con otras especies) que modifican la capacidad de las especies para mantener las poblaciones; 3). *La capacidad de dispersión* a regiones con condiciones ecológicas adecuadas para el desarrollo de la especie; 4). *La capacidad evolutiva de las poblaciones* de la especie para adaptarse paulatinamente a nuevas condiciones (Soberón y Peterson 2005).

En los últimos años gran cantidad de información se ha publicado acerca del papel del clima sobre la distribución de las especies y se acepta que el rango actual de una especie terrestre generalmente esté o haya estado limitado por el clima (Thomas 2010). Por ende cambios en la distribución y abundancia de las especies pueden ser producidos por modificaciones en las condiciones

climáticas que a su vez influyen en la ecofisiología y productividad de las mismas (Peñuelas y Boada 2003, Parmesan y Yohe 2003, Walther *et al.* 2005).

El efecto invernadero

El efecto invernadero es el fenómeno por el cual determinados gases (dióxido de carbono, metano, óxidos de nitrógeno, entre otros) componentes de la atmósfera planetaria retienen parte de la radiación emitida por el sol. Sin esta retención constante de la radiación, la temperatura superficial de la tierra sería 33 °C menos que la actual y la vida como la conocemos no sería posible (Serreze 2009). En el último siglo, este fenómeno se ha intensificado en gran medida producto de la actividad humana consistente en la emisión de dióxido de carbono, metano, halocarbonos y ozono troposférico, entre otros. Como resultado, se ha producido una mayor retención de la radiación en la atmósfera y la temperatura superficial de la tierra está aumentando rápidamente. Se estima que para el año 2100 se experimentarán aumentos en la temperatura de entre 1,5 a 5,8 °C según los modelos previstos por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC 2007), dando lugar a temperaturas medias globales mayores que en cualquier otro momento en el último siglo. Además según estas predicciones, algunas combinaciones de las condiciones climáticas actuales desaparecerán y otras nuevas y no análogas aparecerán principalmente en las regiones tropicales y subtropicales (Williams *et al.* 2007), por lo cual se espera que el cambio climático traiga consigo cambios en la distribución geográfica de

los organismos a una tasa más alta que la observada en el retroceso de los glaciares, con graves consecuencias potenciales para las comunidades biológicas (Parmesan 2006).

Respuestas de las especies frente el cambio climático

La evidencia palinológica y los registros fósiles han demostrado que en el pasado las plantas han respondido con éxito a los cambios ambientales permaneciendo en el clima modificado por tolerancia, adaptación o migrando hacia las condiciones de temperatura nuevas, o una combinación de éstos (Davis y Shaw 2001). Sin embargo, la rapidez de los cambios hace casi improbables respuestas evolutivas que por su naturaleza suelen ser lentas. Además, se estima a partir de reconstrucciones de polen que la velocidad y magnitud del cambio climático actual será mayor a las tasas de migración observadas en plantas (Davis y Shaw 2001, Malcolm *et al.* 2002). Es de esperar que si las especies no logran adaptarse a las modificaciones impuestas por el clima, ni migrar lo suficientemente rápido, haya drásticas reducciones en las áreas de distribución de las especies e incluso en casos más severos, extinción local (Engler *et al.* 2009).

Como resultado a este aumento en la temperatura, producto del cambio climático, se predice que la respuesta más probable consistirá en que las especies se desplazarán hacia los polos y zonas de mayor altitud donde las

temperaturas generalmente son menores y más adecuadas para su sobrevivencia, de hecho datos empíricos concuerdan con estas predicciones para Europa (Kullman 2002, Peñuelas y Boada 2003, Walther 2003, Walther *et al.* 2005, Loarie *et al.* 2008, Lenoir 2008, Loarie *et al.* 2009) y Sur de California (Kelly y Goulden 2008). Todo lo anterior nos dice que cálculos más precisos que evalúen los riesgos de extinción de plantas incorporando su potencial de dispersión son cada vez más necesarios.

Otro factor importante que debe ser considerado cuando se evalúa la respuesta de las especies a los posibles efectos del cambio climático, es la relación filogenética de estas. Por ejemplo, en plantas la respuesta fenológica al cambio climático es a menudo compartida entre especies cercanamente relacionadas (ej. clados), incluso entre comunidades geográficamente separadas (Davis *et al.* 2010). Es así como múltiples tipos de extinción pueden amenazar a grupos de especies relacionadas filogenéticamente, lo cual es consistente con la suposición que especies relacionadas, con características similares comparten una vulnerabilidad intrínseca a tipos comunes de amenazas (Corey y Waite 2008).

Factores que modulan la capacidad de respuesta de las especies al cambio climático mediante desplazamiento.

Las plantas se caracterizan por una amplia gama de mecanismos de dispersión (van der Pijl 1982), que redundan en grandes diferencias en su capacidad intrínseca de dispersión. Las distancias a las cuales estas dispersan sus semillas dependen de las características morfológicas de las semillas, el hábito de las plantas (por ejemplo: altura y grado de postración), el agente de dispersión, así como de las condiciones ambientales que pueden variar fuertemente en tiempo y espacio (Vittoz y Engler 2007).

Vittoz y Engler (2007) realizaron una completa revisión de la literatura disponible sobre dispersión de la flora Suiza, donde caracterizaron las distancias de dispersión basándose en los modos de dispersión y las características de las plantas. Ellos caracterizaron cinco modos de dispersión:

1. *Autocoria*: semillas dispersadas sin la ayuda de un vector externo. Como resultado la dispersión es limitada a muy cortas distancias, donde generalmente las distancias de dispersión corresponden a la longitud del tallo;
2. *Anemocoria*: semillas dispersadas por viento, a menudo con ayuda de estructuras específicas. Las distancias máximas calculadas están por debajo de dos metros pero valores extremos pueden alcanzar hasta 80 metros;
3. *Hidrocoria*: las semillas son dispersadas por el agua de diferentes maneras. En este caso, muy pocas medidas han sido publicadas y están por debajo o cercanas a un metro;

4. *Zoocoria*: las semillas son dispersadas por animales voluntaria o involuntariamente. En este caso, las semillas son movidas de manera eficiente. Las distancias de dispersión varían considerablemente entre dos y 1500 metros;5. *Antropocoria*: las semillas son dispersadas por el hombre. Aunque este tipo de dispersión ha ocurrido desde que el hombre apareció, se ha ido incrementando notablemente en los últimos siglos, producto de la mayor movilidad del ser humano, donde las distancias de dispersión reportadas pueden variar entre 500 y 5000 metros. Las distancias de dispersión reportadas para los diferentes mecanismos de dispersión corresponden al límite superior (percentil 80) de los valores máximos de dispersión y representan el potencial de dispersión de las especies. Sin embargo, es probable que la mayoría de las poblaciones de plantas se dispersen a distancias bastante menores que las indicadas (Vittoz y Engler 2007).

Las tasas de migración de las especies y su capacidad de alcanzar las distribuciones potenciales bajo cambio climático, depende en gran medida de las distancias de dispersión que puedan alcanzar las semillas producidas en cada generación, sumada a la cantidad de semillas producidas anualmente. Incluso sin limitaciones a la dispersión de semillas, los modelos de distribución potencial bajo escenarios de cambio climático predicen extinciones locales por ejemplo, para poblaciones aisladas en las montañas (Thuiller *et al.* 2005). Si debido a limitaciones en la dispersión las plantas no pueden mantener el ritmo

del rápido cambio climático, las tasas de extinción real podrían ser aún mayores que las estimadas bajo estos modelos. Una evaluación más precisa del riesgo de extinción de especies de plantas requiere por tanto la incorporación del potencial de dispersión de las plantas (Pitelka et al 1997).

Modelos predictivos

Los modelos predictivos de distribución de especies son modelos empíricos que relacionan observaciones de campo con variables predictivas ambientales, basados en respuestas estadísticas o teóricas de las superficies (Guisan y Zimmermann 2000). En los últimos años dichos modelos se han convertido en una herramienta importante para contestar preguntas en ecología, biogeografía, evolución y, por extensión, en investigaciones sobre el cambio climático (Guisan y Thuiller 2005). Debido a que el cambio climático representa una amenaza real para la biodiversidad, en la última década se ha visto una proliferación de herramientas que permiten modelar la distribución actual de las especies y luego proyectar la distribución potencial bajo diferentes escenarios de cambio climático. En general los modelos tienden a simplificar la realidad, pero sin duda el desarrollo de estos significa un gran avance para predecir los posibles impactos del cambio climático en las especies.

La precisión de las predicciones sobre cambio climático, en general es fuertemente limitada por la falta de información precisa sobre la capacidad de

dispersión de las especies. En ausencia de datos concretos sobre la dispersión de las especies, los investigadores emplean modelos de distribución que proyectan los impactos del cambio climático sobre las especies, donde suelen considerar los casos extremos de migración consistentes en: a) la opción de "*dispersión ilimitada*" donde supone que no existen barreras o limitaciones a la dispersión y la especie puede potencialmente moverse al nuevo hábitat, y b) "*dispersión limitada*" donde pueden existir barreras a la dispersión y las especies sólo podrían moverse a un nuevo hábitat que se superponga con la distribución original o con áreas contiguas a esta que puedan ser ocupadas (por ejemplo, Loarie *et al.* 2008). Dado la gran diversidad de distancias de dispersión en plantas, el uso de estos dos escenarios extremos puede resultar en errores muy grandes en las predicciones arrojadas por los modelos (Franklin 2010). Hasta ahora, pocos estudios han evaluado el efecto del cambio climático considerando medidas de dispersión estimadas.

Engler y Guisan (2009) construyeron modelos de distribución simulando la dispersión de plantas bajo cambio climático usando escenarios de fragmentación del paisaje en un área en los Alpes Suizos, los datos de dispersión usados por estos autores corresponden a parámetros de dispersión que variaron de 5 a 500 metros. En el caso de árboles Feeley y Silman (2010) consideraron un escenario de migración observada a partir de datos de inventarios de parcelas en los Andes al sureste de Perú, donde calcularon una tasa promedio de migración de 2,5 metros al año.

Propósitos de esta tesis

En esta tesis, investigamos el impacto de dos escenarios de cambio climático (A2 y B2) en la distribución a futuro de todas las especies del género *Montiopsis* (Montiaceae) mediante la aplicación de modelos predictivos y la incorporación de datos empíricos de distancias de dispersión de semillas.

El género *Montiopsis* está compuesto por 18 especies herbáceas, distribuidas desde el norte de Chile y Argentina (en límites con Perú y Bolivia) hasta el sur en la Patagonia Chilena y Argentina. La elección del género *Montiopsis* como objeto de estudio obedece a cuatro consideraciones: 1) El área de distribución del género resulta de gran interés desde el punto de vista de conservación ya que coincide en buena parte con la ubicación de uno de los 25 *Hotspots de Biodiversidad* a nivel mundial (Arroyo *et al.* 1999; Myers *et al.* 2000), con elevado número de endemismos, principalmente de especies herbáceas. Esta área se encuentra sometida a una elevada presión antrópica debido principalmente al cambio en el uso del suelo producto de la agricultura y crecimiento de áreas pobladas, por lo que es considerada una de las áreas con mayores amenazas a la biodiversidad del Sur de Sudamérica (Arroyo *et al.* 2004); 2) Todas las especies del género *Montiopsis* se caracterizan por tener semillas muy pequeñas que son liberadas pasivamente de capsulas no explosivas sin un mecanismo de dispersión evidente, lo que de antemano sugiere distancias de dispersión muy limitadas; 3) La mayoría de los

estudios con modelos de cambio climático se basan en conjuntos de especies de un área geográfica específica (por ejemplo, Loarie *et al.* 2008 (California), Pompe *et al.* 2008 (Alemania), Trivedi *et al.* 2008 (Escocia)), sin considerar las distribuciones geográficas completas de las especies. Al considerar el género completo, y por consiguiente las distribuciones totales de las especies, se pretende llegar a predicciones más precisas sobre las futuras distribuciones de las especies; 4) Una pregunta escasamente estudiada hasta la fecha, es el impacto del cambio climático al nivel de distintos grupos taxonómicos y/o monofiléticos. Considerar todas las especies de *Montiopsis* y los grupos monofiléticos en su interior permitiría hacer inferencias más robustas en cuanto al impacto evolutivo del cambio climático y aportar información que permita proponer estrategias de conservación y manejo de las especies que maximicen la retención de la historia evolutiva del género.

HIPÓTESIS

1. Una limitada capacidad de dispersión en las especies del género *Montiopsis* constituiría un impedimento para que las especies alcancen sus distribuciones potenciales bajo los escenarios de cambio climático B2 y A2.
2. Dada la disminución del área geográficamente disponible a mayores alturas en la Cordillera de los Andes, las especies del género *Montiopsis* que crecen sobre la línea arbórea o su equivalente fitogeográfico sufrirán mayores reducciones en su área potencial de distribución bajo los escenarios de cambio climático B2 y A2, en comparación con las especies que crecen a menores altitudes.
3. Se ha propuesto que especies muy emparentadas relacionadas filogenéticamente deberían tener nichos similares; si esto es así, entonces bajo los escenarios de cambio climático B2 y A2 las especies de los subgéneros *Montiopsis* y *Dianthoideae* mostrarán respuestas de expansión y contracción de sus distribuciones geográficas más similares dentro de cada subgénero que entre estos.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar la distribución potencial futura de las especies y de los grupos monofiléticos al interior del género *Montiopsis* por efectos del cambio climático considerando su capacidad de dispersión.

Objetivos específicos

1. Determinar la distribución potencial actual y la distribución potencial futura de las especies del género *Montiopsis* bajo dos escenarios de cambio climático.
2. Determinar el efecto de la reducida capacidad de dispersión sobre la posibilidad de las especies del género *Montiopsis* de alcanzar las distribuciones potenciales futuras bajo dos escenarios de cambio climático.
3. Comparar la respuesta al cambio climático de las especies y de los grupos monofiléticos al interior del género *Montiopsis*.
4. Comparar las respuestas al cambio climático de las especies que crecen sobre y por debajo del límite arbóreo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Género de estudio

El género *Montiopsis* (Montiaceae) está compuesto por 18 especies distribuidas geográficamente desde los 18°S hasta los 51°S en Chile, Argentina y sus límites con Perú y Bolivia. Altitudinalmente se distribuye entre los 0 y los 4000 m.s.n.m., abarcando los Macrobioclimas Tropical, Mediterráneo y Templado (Luebert y Pliscoff 2006), con algunas especies llegando cerca del límite superior de la vegetación en la Cordillera de los Andes. El género está dividido en dos subgéneros *Montiopsis* con 15 especies, pubescentes (algunas veces glandulares) con polen pantoporado, y el subgénero *Dianthoideae* con tres especies, perennes, glabras o glandulares con polen tricolpado (Ford 1992). Las especies de *Montiopsis* son hierbas anuales o perennes, postradas a semi-erectas, que suelen habitar lugares muy abiertos con suelos arenosos. Con pocas excepciones, tienden a formar manchas muy claramente delimitadas en el espacio (Anexo 1).

Las semillas de todas las especies de *Montiopsis* se producen en capsulas no explosivas que abren en la punta liberando las pequeñas semillas por goteo a medida que éstas maduran en el interior de la capsula. Según datos proporcionados por Ford (1992) las semillas miden entre 0,4-1,0 mm de diámetro. Debido a su pequeño tamaño, y la naturaleza arenosa del substrato,

una vez liberadas, las semillas tienden a enterrarse en el sustrato, disminuyendo la posibilidad de dispersión secundaria. No se ha descrito ningún vector de dispersión para estas especies.

Registros de presencia

Se recopilaron un total de 1824 registros de presencia de todas las especies del género *Montiopsis* (Figura 1), con un mínimo de 25 y un máximo de 228 (\bar{x} = 101) registros por especie, desde la monografía del género (Ford 1992) y de diferentes bases de datos (Mobot, GBIF y colecciones de herbarios nacionales) (Tabla 1). La monografía del género *Montiopsis* se basa en la revisión de todos los registros de herbarios y numerosas colectas realizadas directamente por Ford (1992), lo que nos garantiza homogeneidad en la identificación de los ejemplares y un completo número de registros de ocurrencias con coordenadas verificadas para todas las especies en dicha sección. Los registros correspondientes a la sección *Dianthoideae* provienen de la base de datos personal de Donna Ford y revisión de las diferentes bases de datos y herbarios nacionales.

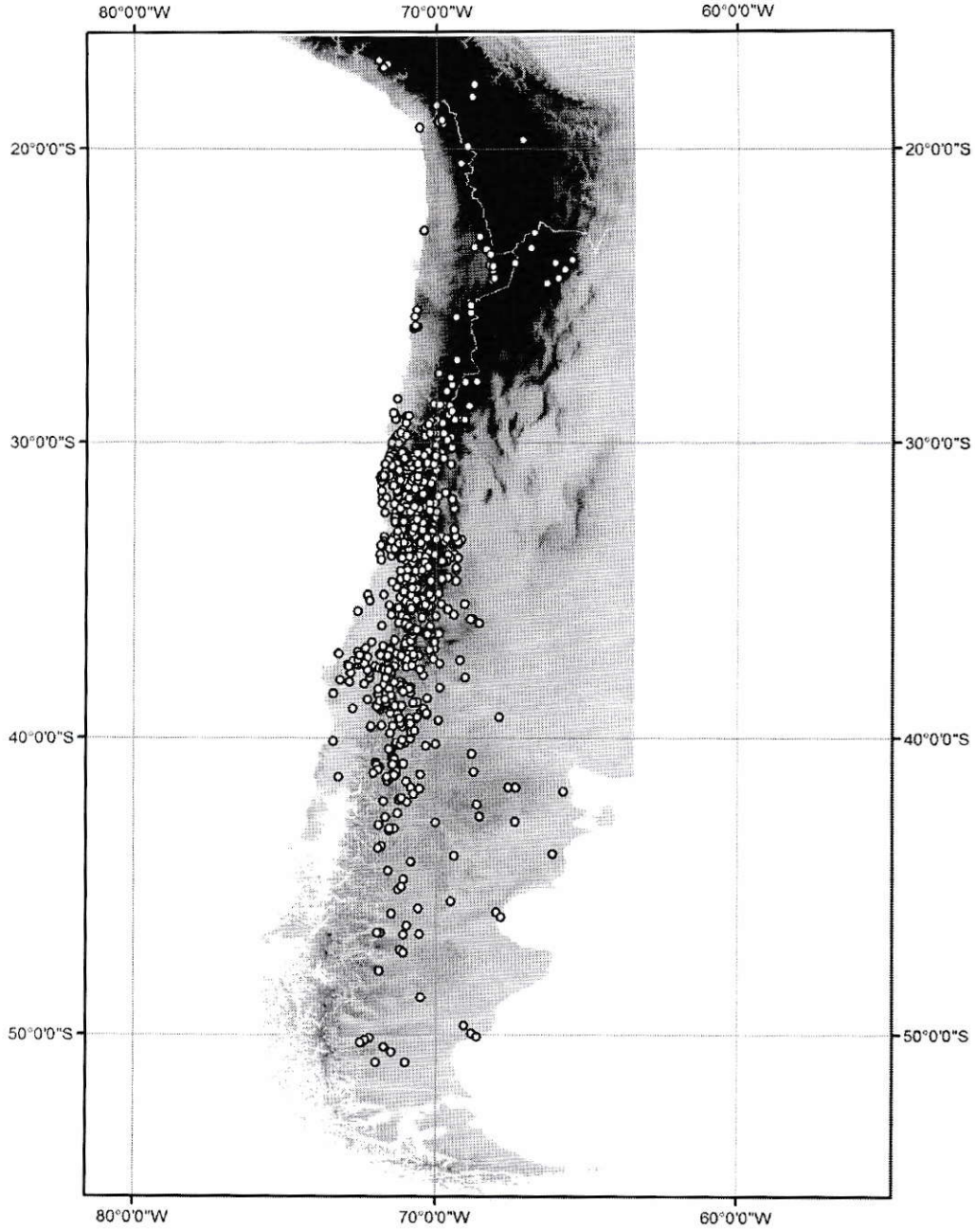


Figura 1. Área total de distribución del género *Montipsisen* el sur de Perú, sur de Bolivia, Chile y Argentina. Los puntos representan la totalidad de las localidades en donde se han colectado las 18 especies reconocidas en el género. En la Tabla 1 se da el número de registros para cada especie.

Tabla 1. Registros usados en el entrenamiento de los modelos construidos con Maxent para las 18 especies del género *Montiopsis*.

Especies	No. registros de entrenamiento
<i>M. andicola</i> *	78
<i>M. cistiflora</i> *	58
<i>M. gayana</i> *	132
<i>M. berteriana</i>	116
<i>M. capitata</i>	184
<i>M. copiapina</i>	43
<i>M. cumingii</i>	54
<i>M. demissa</i>	22
<i>M. gilliesii</i>	132
<i>M. glomerata</i>	27
<i>M. modesta</i>	30
<i>M. parviflora</i>	39
<i>M. potentilloides</i>	35
<i>M. ramosissima</i>	73
<i>M. sericea</i>	46
<i>M. trifida</i>	106
<i>M. umbellata</i>	153
<i>M. uspallatensis</i>	27

*subgénero *Dianthoideae*

Datos climáticos actuales y futuros

Las variables climáticas fueron obtenidas del modelo climático CCMA con resolución de 1Km, disponible en la página web de Worldclim (www.worldclim.org). El escenario climático actual o escenario base está compuesto por 19 variables (Tabla 2), derivadas de la temperatura (mínima y máxima) y la precipitación. A partir de estas 19 variables se seleccionaron las variables que mejor explicaran la distribución actual de las especies, ya que los modelos climáticos muestran un mejor desempeño y sus

resultados son más confiables con un menor número de variables explicativas (Guisan y Thuillier 2005). Para escoger las variables que mejor explicaran la distribución para cada especie se determinó el desempeño de las variables en los modelos de distribución actual en Maxent (Phillips *et al.* 2006; Pearson 2007) a través de una prueba de Jackknife.

Tabla 2. Variables bioclimáticas derivadas de la temperatura mensual y valores de precipitación obtenidas de Worldclim.

Variables bioclimáticas Worldclim
Temperatura promedio anual
Rango promedio diario
Isotermalidad
Temperatura estacional
Temperatura máxima del mes más cálido
Temperatura mínima del mes más frío
Rango de temperatura anual
Temperatura promedio del cuarto más húmedo
Temperatura promedio del cuarto más seco
Temperatura promedio del cuarto más cálido
Temperatura promedio del cuarto más frío
Precipitación anual
Precipitación del mes más húmedo
Precipitación del mes más seco
Precipitación estacional
Precipitación del cuarto más húmedo
Precipitación del cuarto más seco
Precipitación del cuarto más cálido
Precipitación del cuarto más frío

Finalmente un total de seis variables climáticas (precipitación total, mínima y máxima, temperatura promedio, mínima y máxima), así como la elevación,

fueron usadas. Los modelos de las proyecciones futuras fueron realizados bajo dos escenarios climáticos para los periodos 2070-2100 (IPCC 2007): el escenario de emisiones severas de CO₂ (A2) y el escenario de emisiones moderadas de CO₂ (B2), usando las mismas seis variables.

Construcción de modelos de distribución

Para generar las proyecciones se utilizó la aproximación del modelo Maxent (versión 3.3.3e) (Phillips *et al.* 2006) el cual se basa en encontrar la probabilidad de distribución de máxima entropía (Pearson 2007). El uso de Maxent en la generación de modelos de distribución ha sido ampliamente extendida debido a su fácil implementación y su alto desempeño (Elith *et al.* 2006).

Los modelos para cada especie se construyeron usando las siguientes características: diez repeticiones, 10.000 iteraciones y 25% de los registros de presencia para evaluación los cuales son escogidos al azar por Maxent, el resto de las características fueron mantenidas en su forma original. Para la evaluación de los modelos, Maxent calcula el área bajo la curva (AUC) del operador ROC, la cual describe la relación entre la sensibilidad (la proporción de presencias observadas correctamente predichas) y la especificidad (la proporción de ausencias observadas correctamente predichas) (Pearson 2007). El AUC se expresa en valores que van desde 0,5 para modelos al azar hasta 1,0 para modelos perfectos. El cálculo de las áreas de distribución y el análisis

de cambio de los rangos de distribución se llevaron a cabo con los modelos de probabilidades acumulativas transformadas a modelos binarios de presencia/ausencia con un umbral de presencia mayor al 25%, este umbral fue escogido considerando las características y el conocimiento de la distribución actual de las especies. A partir de estos modelos binarios de presencia/ausencia se calcularon las coordenadas X y Y de los centroides de las distribuciones para cada especie en cada escenario con el fin de evaluar el desplazamiento latitudinal.

Cambios en las alturas promedio de la distribución para cada especie y escenario fueron calculados usando los modelos binarios de presencia/ausencia y el modelo de elevación. Mediante la herramienta de ArcMap "Extractbymask" se extrajeron los valores "máximos, mínimos y promedio" para cada especie en los tres escenarios climáticos.

Reconstrucción filogenética

Hershkovitz (2006) publicó la reconstrucción filogenética del género *Montiopsis* basado en el algoritmo de Parsimonia. Sin embargo, con el fin de mejorar la resolución de dicha filogenia, se realizó un análisis filogenético con las secuencias de los genes plastidiales (*ycf3-trnS*) y nucleares (ITS) que se encuentran disponibles en Genbank (Hershkovitz 2006 y Ford 1992), los cuales fueron analizados con los algoritmos: (a) *Parsmonia* en el programa PAUP*

(versión 4.0, Swofford 2003) donde se considera un nodo bien soportado sobre el 70% de valor de bootstrap (Hillis y Bull 1993) y (b) *Inferencia Bayesiana* en el programa MrBayes versión 3.0B4 (Ronquist y Huelsenbeck 2003) donde se consideró un nodo bien soportado aquel que tenía sobre un valor de 95% (Ronquist y Huelsenbeck 2003). Se utilizó el modelo de evolución de secuencias de TrN+G, seleccionado como óptimo por el criterio de información Akaike. Adicionalmente se realizó un análisis de evidencia total, donde se consideraron los caracteres moleculares nucleares y plastidiales en conjunto. La reconstrucción filogenética con evidencia total fue realizada con los dos algoritmos mencionados en el párrafo anterior.

El grupo interno estuvo conformado por las 18 especies del género *Montiopsis* y el grupo externo por nueve especies de los géneros *Cistanthe*, *Calandrinia*, *Lewisia*, *Montia* y *Claytonia*.

Determinación de las distancias de dispersión

Las distancias de dispersión de las semillas fueron determinadas para cuatro especies (*M. capitata*, *M. trifida*, *M. ramosissima* y *M. berteriana*) en el laboratorio, éstas incluyen especies con ramas postradas y especies con ramas semi-erectas. Se colectaron de 20-30 individuos de cada especie, de poblaciones ubicadas en la Región Metropolitana al principio de la época de dispersión de semillas. Las plantas fueron llevadas al laboratorio y montadas en

una ranura de 15 cm de largo entre dos mesones de tal forma que las ramas colgaban sobre el mesón imitando su disposición original en terreno. Cada planta fue puesta en un vaso desechable con papel húmedo y las ramas dispuestas en el ángulo natural. Las plantas permanecieron en estas condiciones durante 2 a 3 semanas, periodo en el cual las semillas fueron liberadas de las capsulas paulatinamente a medida que iban madurando dentro de las capsulas. Para evitar que las semillas rodaran sobre el mesón, se aplicó una capa fina de vaselina sobre la superficie de la mesa. Al cabo del experimento, se determinó el número de semillas que cayeron a intervalos de 1 cm de distancia del eje de la planta y se midió el largo de cada rama y su proyección sobre el mesón. A los valores obtenidos del número de semillas dispersadas a diferentes distancias se les extrajo el 5% de la cola para eliminar datos extremos, los valores obtenidos en laboratorio para cuatro especies se extrapolaron a las demás especies por medio de una regresión del largo promedio del tallo versus los valores máximos de distancia de dispersión. A partir de la ecuación de la regresión se interpolaron las distancias estimadas de dispersión para cada especie, los cuales fueron usados para evaluar la posibilidad de las especies de alcanzar las nuevas áreas disponibles bajo escenarios futuros de cambio climático.

Escenarios de dispersión

Para determinar la posibilidad de las especies de alcanzar las nuevas áreas potenciales bajo cambio climático, se evaluaron dos escenarios: (a) escenario

de *dispersión ilimitada*, el cual asume dispersión donde las especies pueden desplazarse sin limitaciones y (b) escenario de *dispersión estimada*, el cual asume que las especies pueden desplazarse a las distancias de dispersión observada para cada especie según la metodología que se da a continuación. Las áreas de distribución se obtuvieron en ArcMap, a partir de los modelos binarios de presencia-ausencia. Para el escenario “a” las áreas se calcularon directamente del resultado para cada escenario climático, y para el escenario “b” las áreas se calcularon a partir de la intersección entre las áreas actuales y las áreas calculadas bajo dispersión estimada.

Calculo de áreas de distribución con dispersión estimada

Para calcular las áreas de distribución de las especies, primero construimos un área buffer alrededor de la distribución en el escenario actual con el valor de dispersión estimada para cada especie. Posteriormente, cada buffer fue interceptado con los escenarios futuros B2 y A2, obteniendo el área donde podrían moverse las especies por dispersión. Se compararon éstas áreas con el área potencial que arrojaron los modelos de distribución, determinando para cada especie, la proporción del área perdida o ganada, según el caso.

RESULTADOS

Reconstrucción filogenética

La reconstrucción de la filogenia del género *Montiopsis* dio como resultado un árbol con mayor robustez en la separación de los subgéneros con respecto a lo encontrado por Hershkovitz (2006). Se consideró la reconstrucción filogenética con rDNA del gen ITS con Inferencia Bayesiana, por ser la que presenta mayor robustez respecto a las de cpDNA y evidencia total.

La filogenia determinó la existencia de dos linajes bien soportados: el linaje I conformado por el subgénero *Montiopsis* que se compone de las especies *M. ramosissima*, *M. parviliflora*, *M. trifida*, *M. demissa*, *M. sericea*, *M. potentilloides*, *M. umbellata*, *M. uspallatensis*, *M. berteroana*, *M. gilliesii*, *M. glomerata*, *M. cumingii*, *M. capitata*, *M. copiapina*, *M. modesta*, mientras que el linaje II está representado por las especies *M. cistiflora*, *M. gayana* y *M. andicola*, que pertenecen al subgénero *Dianthoideae*. Las relaciones filogenéticas al interior de cada subgénero de *Montiopsis*, no están clarificadas por falta de resolución de los nodos (Figura 2).

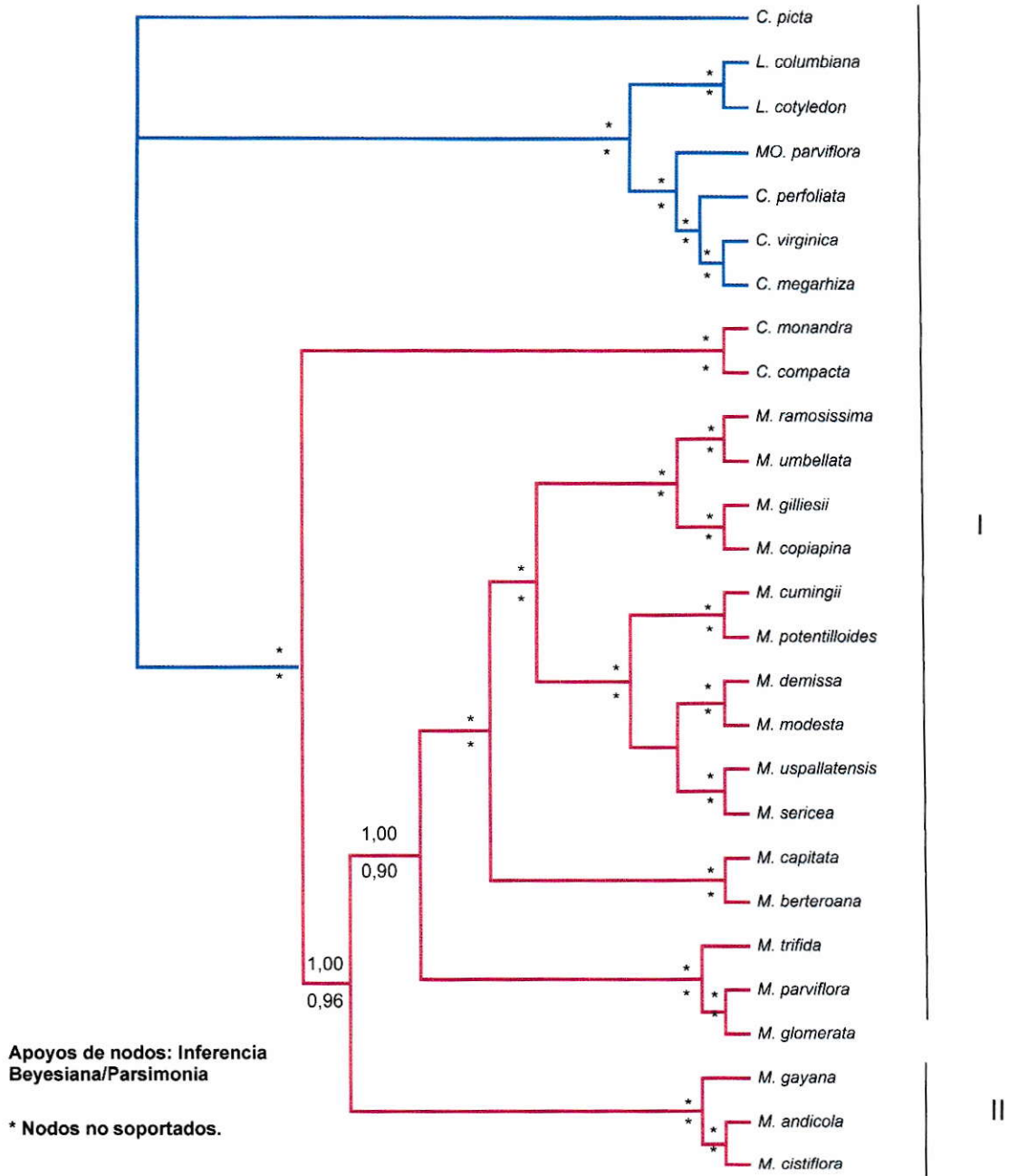
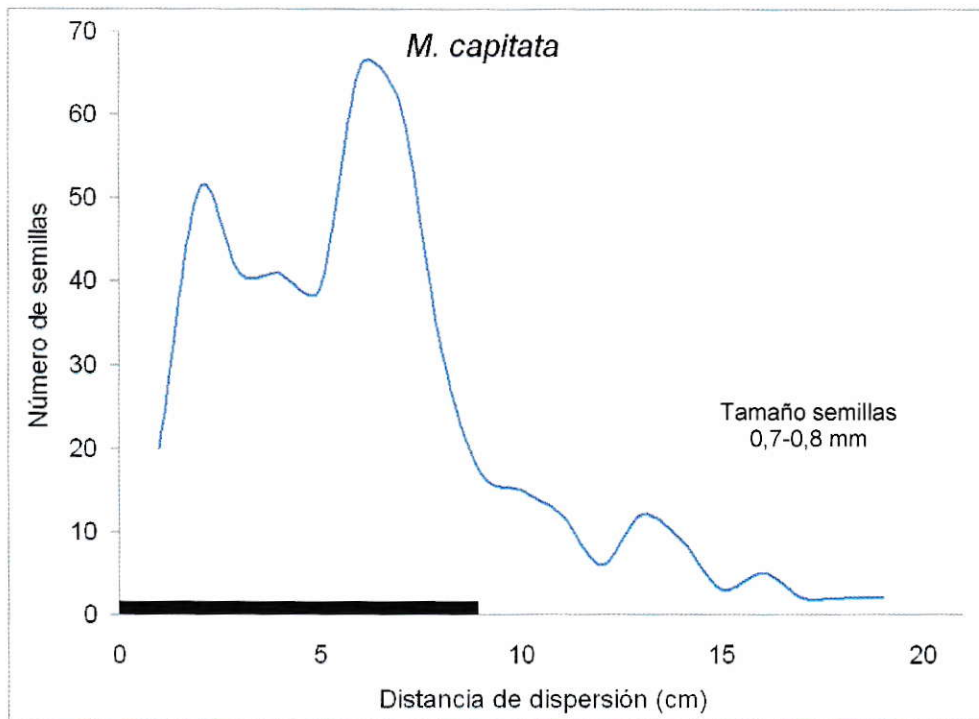


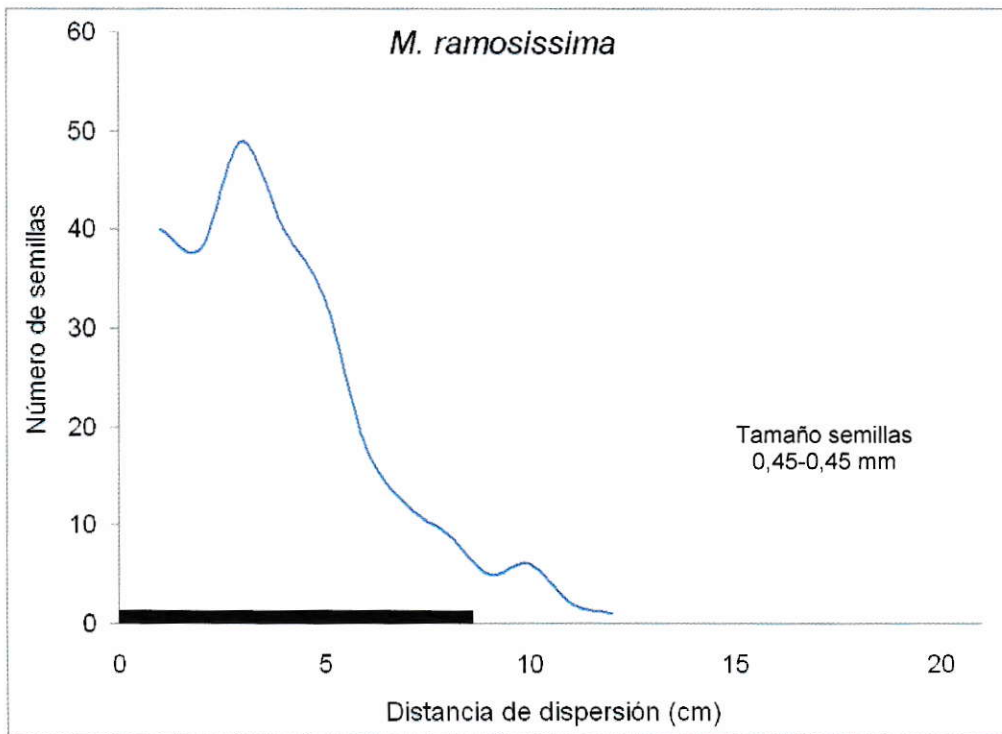
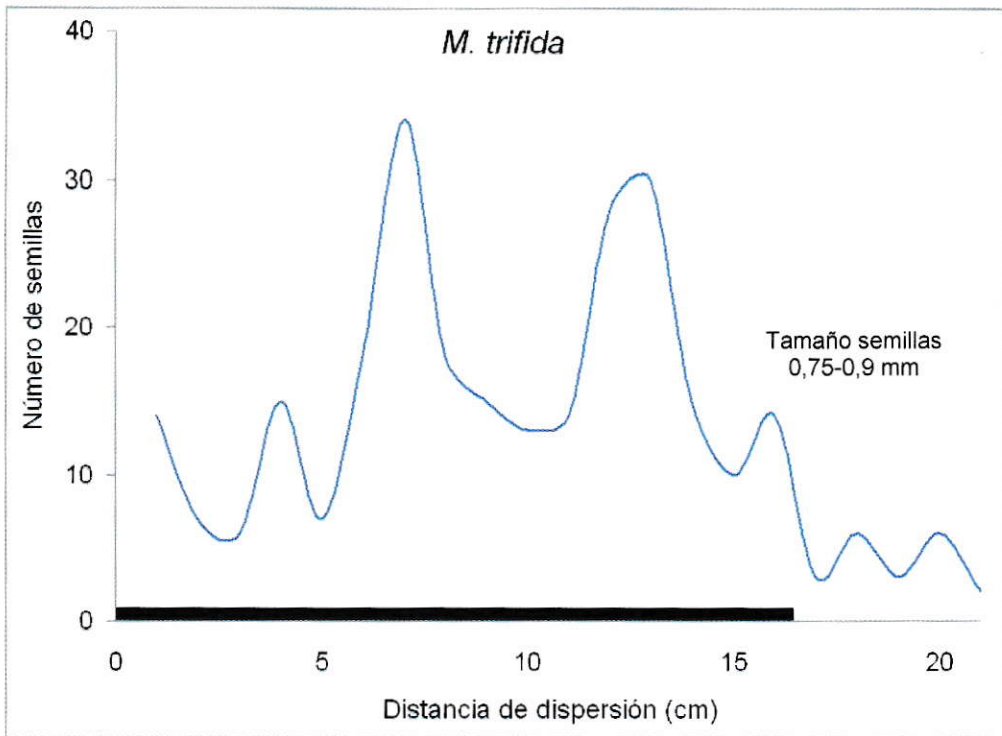
Figura 2.Árbol filogenético de Inferencia Bayesiana, basado en secuencias de rDNA de la región ITS, para 18 especies del género *Montiopsis* (Montiaceae). Los valores de credibilidad y bootstrap se muestran sobre y bajo cada

nodos respectivamente; los asteriscos representan nodos no soportados. Los números romanos representan los dos linajes del género *Montiopsis* (I y II).

Distancias de Dispersión

Las cuatro especies observadas liberaron semillas por un lapso de tiempo de alrededor de dos a tres semanas. Las semillas liberadas cayeron principalmente bajo las plantas y alrededor de las zonas donde se encontraban las infrutescencias con las capsulas maduras (Figura 3).





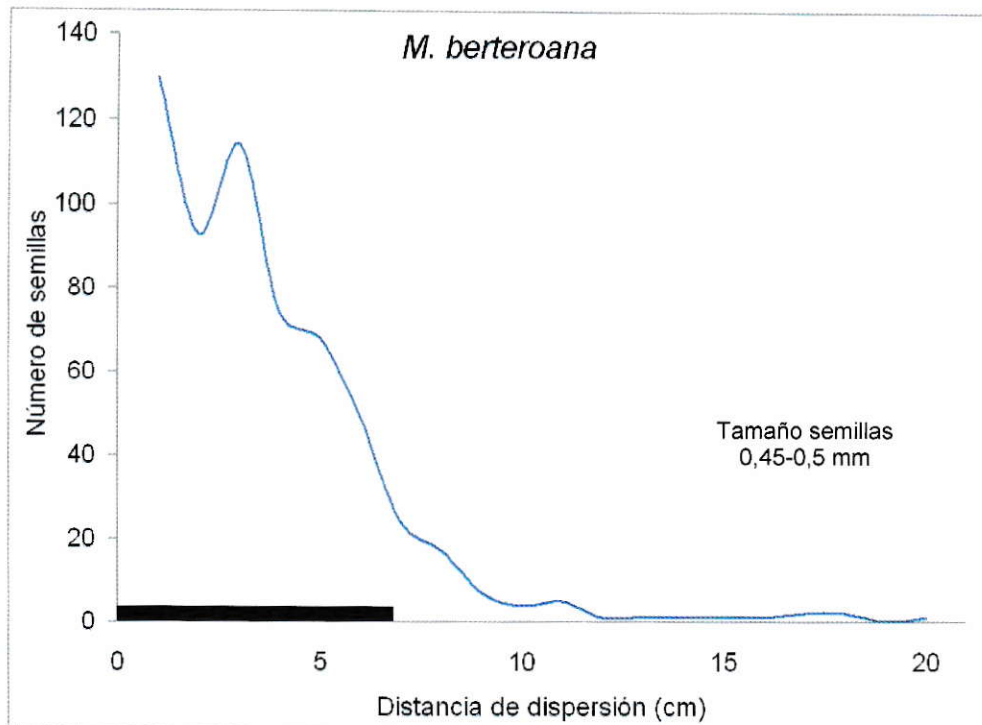


Figura 3. Curvas de dispersión de semillas en cuatro especies de *Montiopsis*. El punto cero corresponde con el eje central de la planta. La línea horizontal oscura señala la proyección sobre el mesón del largo promedio de las ramas desde el eje central de cada planta.

A partir de los valores experimentales obtenidos para las cuatro especies, se llevó a cabo una regresión entre la distancia máxima de dispersión de las semillas y el largo promedio de las ramas para cada especie (Figura 4). Con base en esta curva y los largos promedio de las ramas de las demás especies, se estimó la distancia de dispersión para las 18 especies ($F=261,7$; $p=0,0038$)

Las distancias de dispersión estimadas para las 18 especies fluctuaron entre 4,7 y 21,6 cm al año indicando una capacidad de dispersión muy limitada en todas las especies (Tabla 3).

?

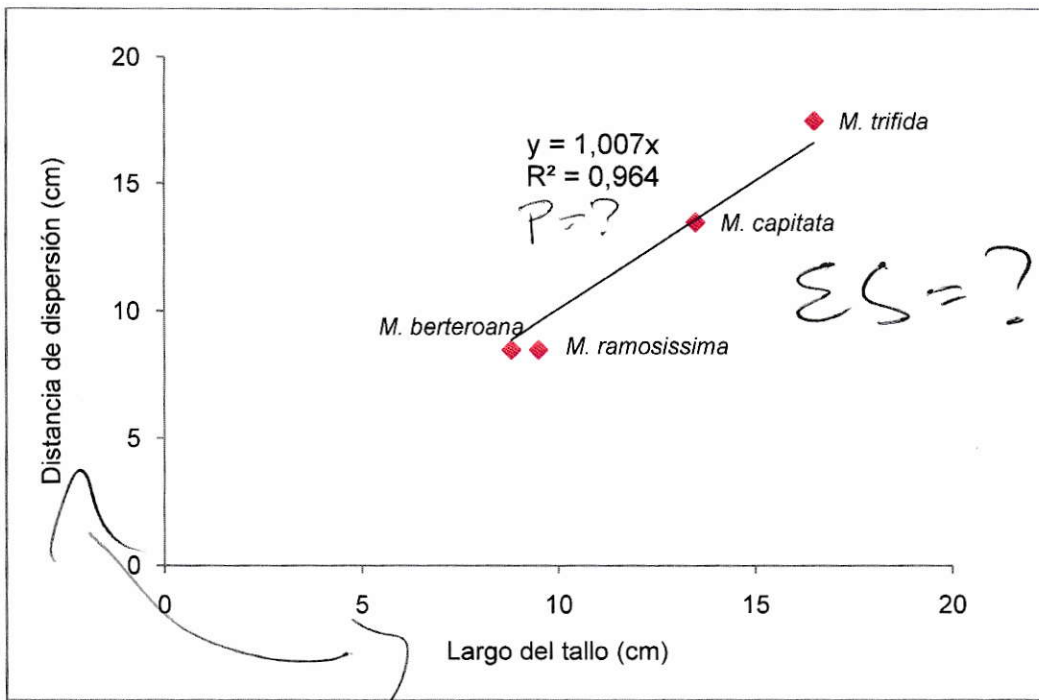


Figura 4. Regresión de el largo del tallo vs. las distancias de dispersión para cuatro especies del género *Montipopsis*.

Tabla 3. Distancias de dispersión estimadas, obtenidas a partir de la regresión de las distancias de dispersión vs. el largo del tallo para las 18 especies del género *Montiopsis*.

Especies	Promedio largo tallo (cm)	Distancia de dispersión estimada (cm)
<i>M. andicola</i> *	7,3	7,2
<i>M. cistiflora</i> *	11,5	11,4
<i>M. gayana</i> *	10,4	10,3
<i>M. berteroana</i>	8,5	8,4
<i>M. capitata</i>	17,5	17,4
<i>M. copiapina</i>	7,5	7,4
<i>M. cumingii</i>	6,5	6,5
<i>M. demissa</i>	6,75	6,7
<i>M. gilliesii</i>	9	8,9
<i>M. glomerata</i>	4,5	4,5
<i>M. modesta</i>	9,25	9,2
<i>M. parviflora</i>	12,5	12,4
<i>M. potentilloides</i>	4,5	4,5
<i>M. ramosissima</i>	11,25	11,2
<i>M. sericea</i>	7,5	7,4
<i>M. trifida</i>	20,5	20,4
<i>M. umbellata</i>	16,5	16,4
<i>M. uspallatensis</i>	4,5	4,5

* subgénero *Dianthoideae*

Modelos de distribución

Los valores de AUC obtenidos para todos los modelos construidos bajo los escenarios climáticos Actual, B2 y A2 fueron entre 0,941 y 0,997 con un

promedio de 0,979 lo que representa un excelente desempeño de los modelos. En cuanto al desplazamiento latitudinal, las coordenadas “Y” de los centroides correspondientes a la latitud en el centro de la distribución para cada especie muestran que al comparar el escenario climático actual y los escenarios climáticos futuros, 13 de las 18 especies desplazarían sus centroides latitudinalmente hacia el sur del continente desde 10 hasta 700 km (Figura 5).

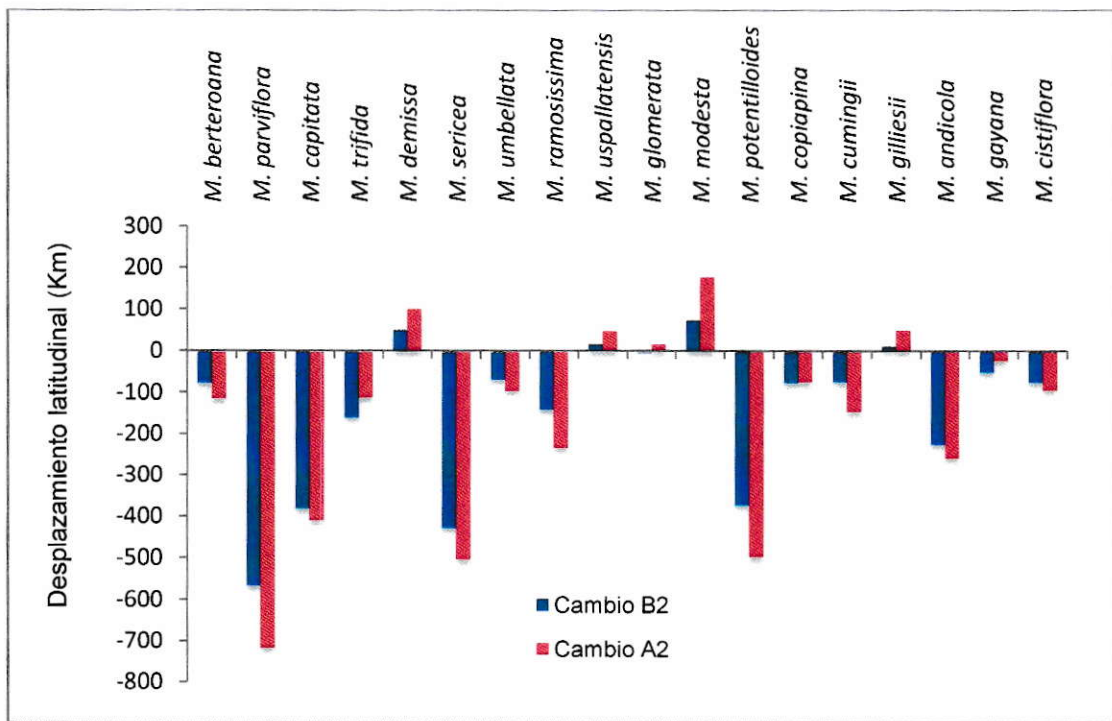


Figura 5. Diferencia en desplazamiento latitudinal (Km) de los centroides de las distribuciones para las 18 especies en los escenarios futuros B2 y A2.

Así mismo, al comparar las alturas promedio, máximas y mínimas para cada distribución se encontró que hay una tendencia de las especies a desplazarse altitudinalmente. En las especies de distribución andina el cambio se evidencia

principalmente en las alturas mínimas las que aumentarían mostrando un desplazamiento altitudinal del límite inferior de la distribución. En cuanto a las especies subandinas se observarían desplazamientos altitudinales promedio hacia arriba o hacia abajo del promedio altitudinal actual, así como en el límite superior de la distribución (Figura 6).

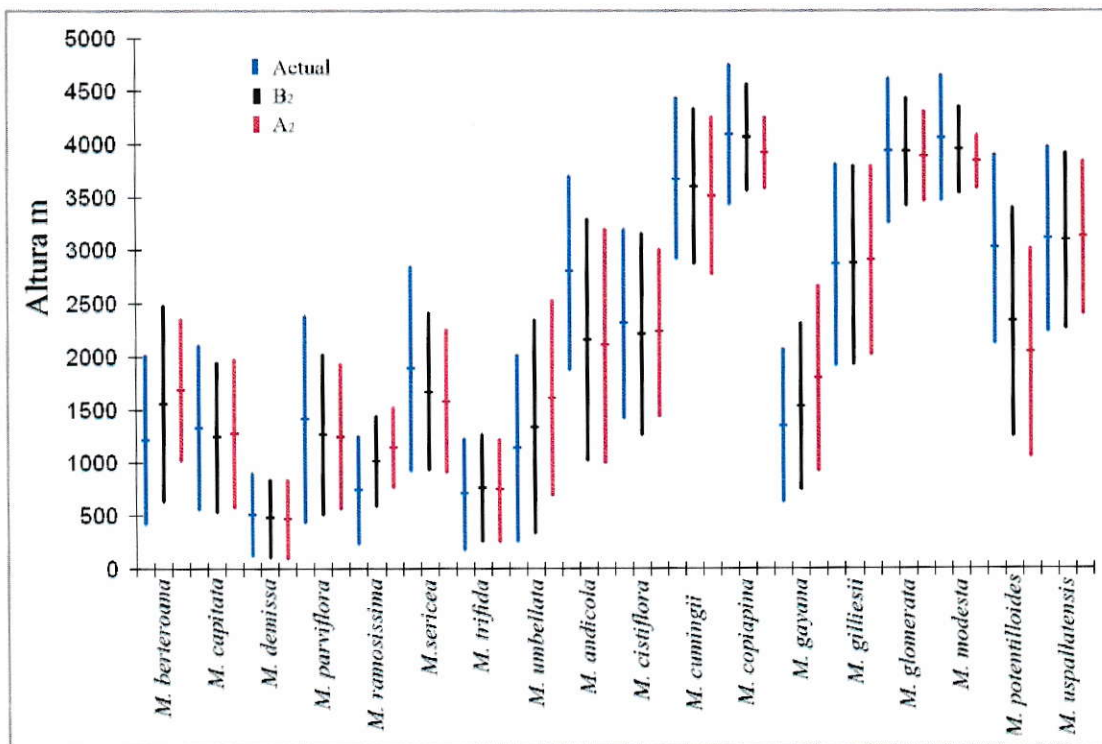


Figura 6. Desplazamiento altitudinal (m) de las distribuciones para las 18 especies en los tres escenarios climáticos (Media+/-DE).

Dispersión ilimitada

Los modelos de distribución obtenidos para el género *Montipopsis* revelan

contracciones y expansiones en las áreas de distribución potencial bajo los escenarios futuros B2 y A2 y bajo un escenario de dispersión ilimitada (Figura 7)(Anexo 2). El 61,1% de las especies del género experimentarían contracción de las áreas potenciales de distribución de entre el -3% y el -79 %. Las expansiones para los restantes 38,9% de las especies iría entre el 1% y 41%, considerando contracciones y expansiones, el promedio fue de -10,66% (EE=8,23) para el escenario B2 y -23,21% (EE=8,56) para el escenario A2.

Las especies de distribución predominantemente andina experimentarían cambios más fuertes tanto en el en el escenario B2 ($\bar{x}=-17,72$; EE=9,75) como en el escenario A2 ($\bar{x}=-32,11$; EE=10,61) mientras que las especies subandinas experimentarían cambios menos fuertes en el escenario B2 ($\bar{x}=-1,85$; EE=5,77) y en el escenario A2 ($\bar{x}=-12,09$; EE=4,36) (Figura 7).

Los cambios más drásticos se esperarían para *M. cumingii*, *M. glomerata*, *M. modesta* y *M. copiapina*, las cuales experimentarían contracciones de sus áreas de distribución potencial actual que fluctúan entre 37,6% y 79,7% en el escenario B2 y entre 63,8% y 97,3% en el escenario A2. Estas cuatro especies se distribuyen en el norte y centro de Chile con alturas superiores a los 2000 msnm.

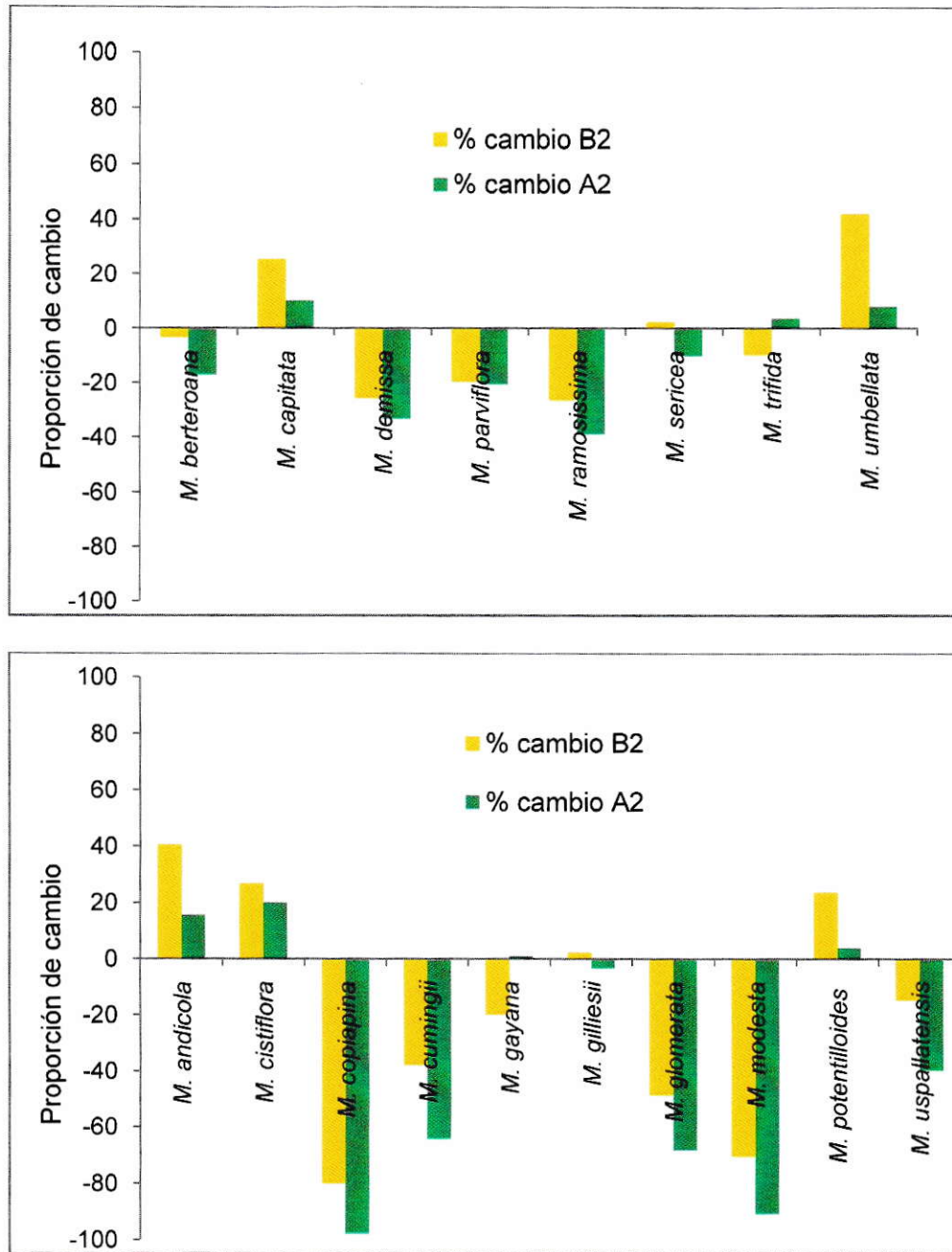


Figura 7. Proporciones de cambio en el área de distribución entre los escenarios Actual-B2 y Actual-A2 para las especies subandinas (A) y las especies andinas (B), en un escenario de dispersión ilimitada.

Dispersión estimada

Las distancias estimadas de dispersión evidenciaron un fuerte efecto de contracción de las distribuciones potenciales en los dos escenarios climáticos futuros, con respecto a la dispersión ilimitada, para todas las especies del género *Montiopsis*. Las contracciones de las áreas variaron entre el 4,94% al 79,63% en el escenario B2 y 8,43% a 97,33% en el escenario A2 (Figura 8). Al igual que en el escenario de dispersión ilimitada las especies que más se verían afectadas por efecto de cambio climático serían las especies andinas tanto en el escenario climático A2 ($\bar{x} = -53,04$; EE=7,08) como en el B2 ($\bar{x} = -36,73$; EE=5,93). En cuanto a las especies subandinas las contracciones estimadas serían menores en el escenario climático A2 ($\bar{x} = -53,04$; EE=7,08) y en el B2 ($\bar{x} = -53,04$; EE=7,08) (Figura 8).

Bajo este escenario de dispersión estimada siete especies experimentarían contracciones por encima del 60% de su distribución potencial actual, cinco de distribución andina y dos de distribución subandina. En cuanto a las especies que se distribuyen al sur, *M. berteroana*, *M. capitata*, *M. gayana*, *M. umbellata*, *M. andicola* y *M. cistiflora* presentarían menores reducciones en sus áreas de distribución potencial que el resto de las especies del género.

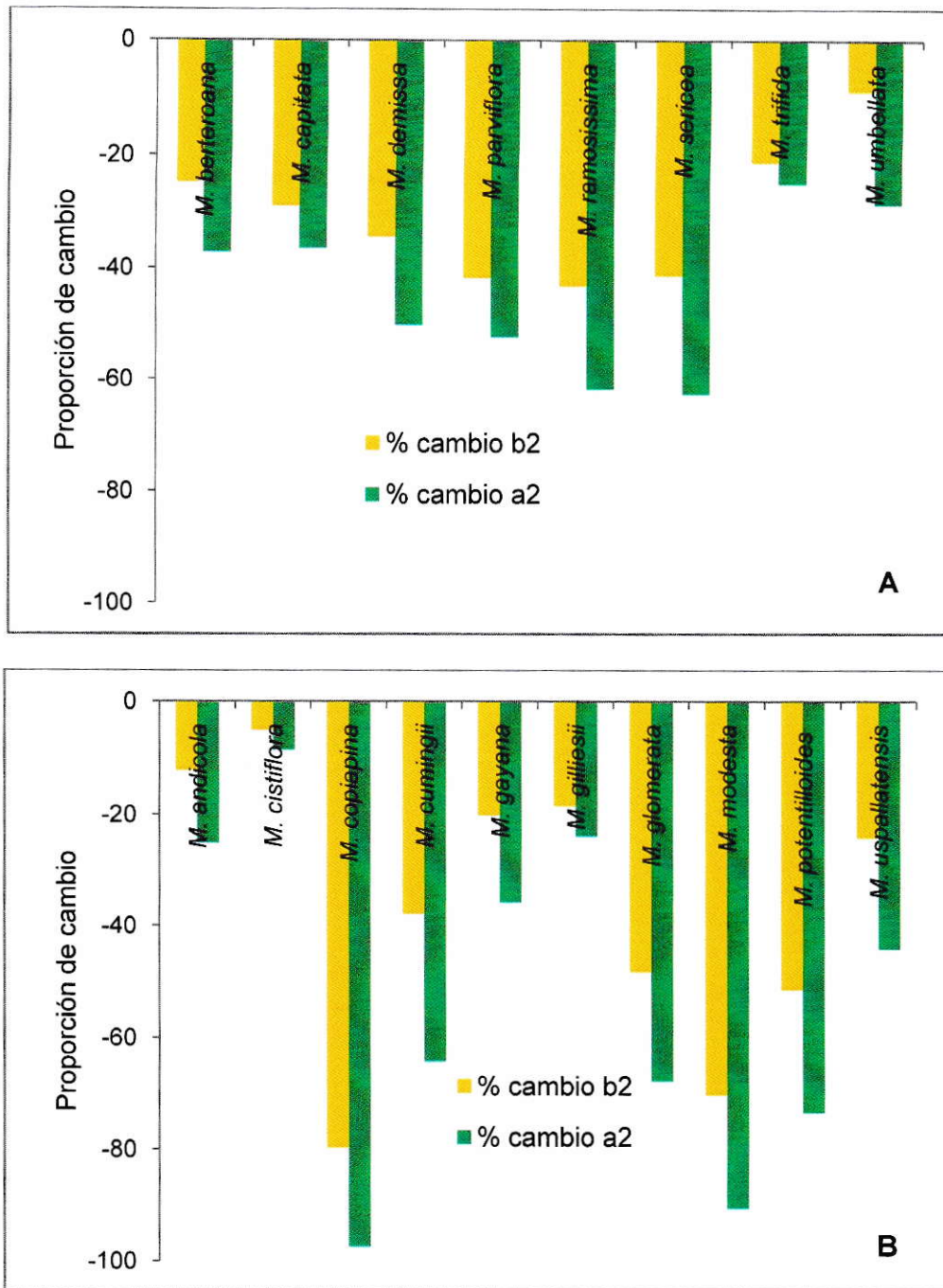


Figura 8. Proporciones de cambio en el área de distribución entre los escenarios actual-B2 y actual-A2 para las especies subandinas (A) y las especies andinas (B) en un escenario de dispersión estimada.

Comportamiento de los dos grupos monofiléticos de Montiopsis

La resolución de la filogenia confirma la existencia de dos grupos monofiléticos, los que corresponden con los dos subgéneros *Montiopsis* y *Dianthoideae*. En cuanto a los resultados obtenidos en los modelos de distribución potencial bajo los escenarios climático y de dispersión ilimitada, la intersección de las áreas ocupadas por las especies de cada subgénero, mostró que el subgénero *Montiopsis* experimentaría una contracción del 15,04% en el escenario B2 y del 35,5% en el escenario A2, mientras el subgénero *Dianthoideae* experimentaría una expansión de 4,62% en el escenario B2 y una contracción del 11,24% en el escenario A2 (Tabla 5). Bajo este escenario de dispersión ilimitada, la mayor parte del área de distribución se perdería en las zonas de menor altura del rango y hacía el sur de la distribución de las especies del género completo. En cuanto al escenario de dispersión estimada ambos subgéneros presentan grandes contracciones, pero en términos relativos el subgénero *Dianthoideae* presenta una menor contracción con respecto a su distribución potencial actual que el subgénero *Montiopsis* (Tabla 4).

Tabla 4. Proporción de cambio en las áreas de distribución potencial entre los escenarios climáticos actual-B2 y actual-A2, para los subgéneros *Montiopsis* y *Dianthoideae*.

	Actual-B2		Actual-A2	
	<i>Montiopsis</i>	<i>Dianthoideae</i>	<i>Montiopsis</i>	<i>Dianthoideae</i>
Dispersión ilimitada	-15,04	4,68	-35,50	-11,24
Dispersión estimada	-31,80	-14,61	-50,35	-26,41
Uso de la tierra y dispersión estimada	-32,59	-15,58	-51,05	-25,15

DISCUSIÓN

Montiopsis es un género compuesto por plantas herbáceas, principalmente postradas, con tamaños de rama que no superan los 20 cm, creciendo en suelos arcillosos y pedregosos, con semillas de tamaño menores a 1 mm (Ford 1992) donde la mayoría de las semillas caen por gravedad no más allá de la longitud de sus ramas, estas características hacen que estas especies presenten dispersión muy limitada. Los valores de dispersión encontrados en laboratorio para las cuatro especies de *Montiopsis*, mostraron una baja capacidad de las especies a migrar o desplazarse lo suficiente para permanecer en equilibrio con el cambio climático estimado para el año 2100 en los escenarios climáticos B2 y A2, valores similares a estos han sido reportados para otras especies herbáceas (Engler *et al.* 2009; Castor 2005, Lenoir *et al.* 2008; Bullock y Clark 2000). No obstante, siempre es posible que unas pocas semillas escapen o sean llevados por vientos fuertes, situación que es difícil simular en el laboratorio. Sin embargo, la probabilidad de sobrevivencia de estas pocas semillas seguramente sería muy baja. Este patrón de dispersión, se hace evidente en el modo en que crecen las poblaciones las cuales pueden ser encontradas en parches bien establecidos pero discontinuos a lo largo del paisaje. No obstante, estas especies tienen generaciones de rápido crecimiento y reproducción que podrían mejorar sus expectativas de alcanzar nuevas áreas en contraposición a especies de árboles que tienen generaciones más lentas

(Engler et al. 2009).

Existen otros factores importantes que pueden afectar la tasa de migración de las especies negativamente como las barreras naturales (ríos, lagos, bosques o valles y cordilleras) (Engler y Guisan 2009) y la fragmentación del hábitat por actividades humanas (Pitelka *et al.* 1997, Davis y Shaw 2001). Dichas barreras afectan tanto las distancias de dispersión como el éxito de establecimiento después de la dispersión, los cambios en el uso de la tierra representan una de las más grandes amenazas a la biodiversidad terrestre, más aún cuando se esperan cambios más dramáticos para este siglo (Jetz *et al.* 2007) por lo cual, es importante incluir en este tipo estimaciones sobre cambio climático factores como barreras a la dispersión y el uso de la tierra (Feeley y Silman 2010).

Los resultados obtenidos para las 18 especies del género *Montiopsis* muestran que las predicciones sobre el cambio climático varían de acuerdo al escenario climático y los parámetros de dispersión que se consideren. Los modelos de distribución potencial predicen contracciones y expansiones de las áreas bajo los escenarios climáticos A2 y B2 para el 2100 considerando un escenario de dispersión ilimitada donde las especies pueden desplazarse a las nuevas áreas. En contraste para los escenarios climáticos considerando dispersión estimada las predicciones son más drásticas que para el escenario de dispersión ilimitada y todas las especies experimentarían contracciones de sus áreas, dejando en evidencia la necesidad de usar distancias de dispersión más precisas para

evaluar los posibles efectos del cambio climático. Escenarios de dispersión ilimitada muestran respuestas que pueden resultar en una sobrestimación de la capacidad de las especies de alcanzar las nuevas áreas y no representan los escenarios más indicados para predecir futuras distribuciones por efecto del cambio climático. Marquet y colaboradores (2010) evaluaron 13 de las 18 especies del género *Montiopsis* bajo escenarios de cambio climático y dispersión limitada e ilimitada y encontraron que estas especies no experimentarían cambios muy severos en su distribución potencial futura, contrario a lo encontrado en este trabajo. Nosotros creemos que estas diferencias se deben fundamentalmente a la escala, el área de distribución usada y los escenarios de dispersión usados.

Tal como ha sido predicho para otras especies en otras áreas (Kullman 2002, Peñuelas y Boada 2003, Walther 2003, Walther *et al.* 2005, Loarie *et al.* 2008, Lenoir 2008, Loarie *et al.* 2009), se encontró que las especies del género *Montiopsis* muestran un desplazamiento de su distribución potencial bajo efecto del cambio climático hacia el sur modificando su distribución latitudinal en varios kilómetros que puede ir desde 10 hasta 700 km, y hacia zonas de mayor altura donde se observarían cambios no sólo en la altura promedio de la distribución sino también en los valores mínimos y máximos del rango. Aquí encontramos que las especies de distribución andina muestran mayores contracciones de su distribución potencial que las especies subandinas en los dos escenarios de

dispersión, siendo más drásticos si se considera dispersión estimada. Bajo este escenario de dispersión estimada, la pérdida de área potencial disponible tiende a ser más grande en las especies de distribución andina en el norte y sur de la distribución en Chile y Argentina. Esto ha sido explicado como una tendencia de las especies a “*escapar del cambio climático*” (Loarie *et al.* 2008, Lenoir 2008, Loarie *et al.* 2009), como consecuencia de este desplazamiento a áreas de mayor altura; se esperaría entonces que las especies se encuentren en condiciones más restringidas en su distribución debido a la disminución del área disponible a mayor altura como efecto de menor área en la cordillera.

Por último, la evaluación de los efectos del cambio climático en los subgéneros *Montiopsis* y *Dianthoideae* mostró que hay diferencias en la magnitud de la respuesta de cada subgénero, donde *Dianthoideae* presentaría menores contracciones de su rango de distribución potencial en los dos escenarios climáticos futuros y en los escenarios de dispersión ilimitada y estimada. Estos resultados revelan una interesante imagen del impacto del cambio climático no sólo sobre un grupo de especies sino también sobre los linajes presentes en un área particular. Muchos factores influyen en la respuesta de las especies al cambio climático, sin embargo la respuesta de linajes puede dar información relevante sobre los posibles efectos del cambio climático sobre la diversidad de especies e historia evolutiva.

Un factor importante que hace de este género un buen ejemplo de estudio, es su amplia distribución en el Hotspot de Chile central, un área de gran interés para la conservación y que puede verse afectada fuertemente por los efectos del cambio climático debido a sus grandes contrastes climáticos. Efectos sobre la distribución de las especies allí presentes, podrían ser drásticos si consideramos la gran cantidad de especies herbáceas que pueden tener dispersión limitada. Los resultados obtenidos aquí hacen llamar la atención de lo que podría ocurrir no solamente con las especies sino también con los géneros y su historia evolutiva, en un área de gran diversidad y alto número de endemismos. Especies cercanamente relacionadas con características filogenéticas similares pueden presentar respuestas a amenazas como el cambio climático, más similares entre sí. Es por esto que evaluar la respuesta individual y de grupos emparentados de especies puede dar luces sobre estrategias de conservación que permitan conservar tanto especies como historia evolutiva (Forest *et al.* 2007; Sechrest *et al.* 2002)

CONCLUSIONES

Las especies del género *Montiopsis* mostrarían limitaciones para dispersarse hasta los hábitats potenciales futuros modelados bajo los escenarios de cambio climático B2 y A2 debido a su limitada capacidad de dispersión. Este patrón podría repetirse en todas aquellas especies que poseen dispersión reducida, dando como resultado efectos más negativos que los observados en los modelos de cambio climático realizados hasta ahora. Como consecuencia, sería necesario pensar en estrategias de conservación tales como translocación manual planificada de plantas a lugares aptos.

Las especies andinas del género *Montiopsis* mostrarían una mayor reducción de su área de distribución comparado con las especies subandinas. Esto podría deberse a un menor área disponible a mayor altura lo que limitaría la distribución potencial de las especies. Adicionalmente se observarían cambios en los límites de los rangos de distribución, donde el límite inferior de las especies andinas se movería a zonas más altas de la distribución potencial.

Las especies del subgénero *Dianthoideae* mostraron una disminución en su distribución potencial bajo escenarios de cambio climático menor, en comparación a las especies del subgénero *Montiopsis*, lo cual podría deberse a la relación filogenética existente entre las especies y a la distribución

geográfica compartida del subgénero *Dianthoideae* hacia el sur en la Patagonia, donde los efectos del cambio climático pueden ser menores.

Desde el punto de vista de la conservación de las especies y de su historia evolutiva, es de gran relevancia evaluar los posibles impactos del cambio climático no solo en especies individuales, sino también en grupos emparentados e incluir la capacidad de dispersión de las especies, así como cambios en el uso de la tierra que permitan proponer estrategias de manejo y mitigación.

REFERENCIAS

Arroyo, M. T. K., R. Rozzi, J. A. Simonetti, P. Marquet & M. Salaberry. 1999. Central Chile. Pp. 160-171 en R. A. Mittermeier, N. Myers, P. Robles Gil & C. G. Mittermeier, Hotspots: Earth's biologically richest and most endangered terrestrial ecoregions. Cemex, Ciudad de México.

Arroyo, M.T.K., P.A. Marquet, C. Marticorena, J. Simonetti, L. Cavieres, F. Squeo y R. Rozzi. 2004. Chilean winter rainfall-Valdivian forest. Pp. 99-103 En: R. Mittermeier, P. Robles-Gil, M. Hoffmann, J. Pilgrim, T. Brooks, C. Goettsch-Mittermeier, J. Lamoreaux y G. A.B. DA Fonseca (eds.) Hotspotsrevisited. Cemex, México.

Brown, J.H., Stevens, G.C. y D.M., Kaufman. 1996. The geographic range: size, shape, boundaries, and internal structure. Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics. 27:597-623.

Bullock, J. M. y R. T. Clarke. 2000. Long distance seed dispersal by wind: measuring and modelling the tail of the curve. Oecologia 124:506-521.

Castor, C. 2002. Patrones, procesos y mecanismos de dispersión en plantas de Chile Central. Tesis Doctoral, Universidad de Chile. Santiago, Chile.

Corey, S.J. y T.A. Waite. 2008. Phylogenetic autocorrelation of extinction threat in globally imperilled amphibians. *Diversity and distributions* 14:614-629.

Davis, M.B. y R.G. Shaw. 2001. Range shifts and adaptive response to quaternary climate change. *Science* 292:673-679.

Davis, C.C., C.G. Willis, R.B. Primack y A.J. Miller-Rushing. 2010. The importance of phylogeny to the study of phenological response to global change. *Philosophical transactions of the royal society biological science* 365:3201-3213.

Elith, J., C.H. Graham, R.P. Anderson, M. Dudík, S. Ferrier, A. Guisan, R.J. Hijmans, F. Huettmann, J.R. Leathwick, A. Lehmann, J. Li, L.G. Lohmann, B. A. Loiselle, G. Manion, C. Moritz, M. Nakamura, Y. Nakazawa, J. McC. Overton, A. T. Peterson, S. J. Phillips, K. Richardson, R. Scachetti-Pereira, R.E. Schapire, J. Soberón, S. Williams, M. S. Wisz y N.E. Zimmermann. 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography* 29:129-151.

Engler, R., C.F. Randin, P. Vittoz, T. Czaka, M. Beniston, N.E. Zimmermann y A. Guisan. 2009. Predicting future distributions of mountain plants under climate change: does dispersal capacity matter? *Ecography* 32:34-45.

Engler, R. y A. Guisan. 2009. MigClim: Predicting plant distribution and dispersal in a changing climate. *Diversity and Distributions* 15(4):590-601.

Feeley, K.J.y M.R. Silman. 2010. Land-use and climate change effects on population size and extinction risk of Andean plants. *Global Change Biology* 16(2):3215-3222.

Franklin, J. 2010. Moving beyond static species distribution models in support of conservation biogeography. *Diversity and Distributions* 16:321-330.

Ford, D.I. 1992. Systematics and evolution of *Montiopsis* subgenus *Montiopsis* (Portulacaceae). A dissertation presented to the graduate school of arts and sciences of Washington University. Saint Louis, Missouri.

Forest F., R. Grenyer, M. Rouget, T.J. Davies' R. M. Cowling, D.P. Faith, A. Balmford, J.C. Manning, Ş.Procheş, M. van der Bank, G. Reeves, T.A.J. Hedderson y V. Savolainen. 2007. Preserving the evolutionary potential of floras in biodiversity hotspots. *Nature* 445:757-760.

Guisan, A. y N.E. Zimmermann. 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling* 135:147-186.

Guisan, A. y W. Thuillier. 2005. Predicting distributions species: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters* 8:993-1009.

Hershkovitz, M. 2006. Ribosomal and chloroplast DNA evidence for diversification of western American Portulacaceae in the Andean region. *Gayana Botanica* 63(1):13-74.

Hillis, D.M. y J.J. Bull. 1993. An Empirical Test of Bootstrapping as a Method for Assessing Confidence in Phylogenetic Analysis. *Systematic Biology* 42(2):182-192.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. Climate change 2007: the physical science basis. Working Group 1 contribution to the fourth assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change, summary for policymakers, technical summary and frequently asked questions. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.

Jetz, W., D.S. Wilcove y A.P. Dobson. 2007. Projected impacts of climate change and land-use change on the global diversity of birds. *Plos Biology* 5(6):1211-1219.

Kelly A.E y M.L. Goulden. 2008. Rapid shifts in plant distributions with recent

climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105(33):11823-118236.

Kullman, L. 2002. Rapid recent range-margin rise of tree and shrub species in the Swedish Scandes. *Journal of Ecology* 90:68-77.

Lenoir, J., J.C. Gégout, P.A. Marquet, P. de Ruffray H. Brisse. 2008. A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Science* 320:1768-1771.

Loarie, S.T., B.E. Carter, K. Hayhoe, S. McMahon, R. Moe, C.A. Knighty D.D. Ackerley. 2008. Climate change and the future of California's endemic flora. *Plos One* 3(6):e2502.

Loarie, S.T., P.B. Duffy, H. Hamilton, G.P. Asner, C.B. Field y D.D. Ackerly. 2009. The velocity of climate change. *Nature* 462:1052-1055.

Luebert, F.y P. Plischoff. 2006. *Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile*. Editorial Universitaria, Santiago. 315 pp.

Malcolm, J.R., Markham, A., Neilson, R.P. y M. Garaci. 2002. Estimated migration rates unders cenarios of global climate change. *Journal of*

Biogeography 29:835-849.

Marquet, P., S. Abades, J. Armesto, I. Barria, M.T.K. Arroyo, L. Caviares, R. Fajardo, C. Garin, F. Labra., F. Meza, P. Plischoff, C. Prado, P. Ramírez de Arellano y S. Vicuña. 2010. 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. Santiago de Chile, Chile. 154 pp.

Myers, N., R.A. Mittermeier, C.G. Mittermeier, G.A.B. da Fonseca y J., Kent. 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403:853–858.

Parmesan, C. y G. Yohe. 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* 421:37-42.

Parmesan, C. 2006. Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 37(1):637-669.

Pearson, R.G. y T.E. Dawson. 2003. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global Ecology and Biogeography* 12:361-372.

Pearson, R.G. 2007. Species' Distribution Modeling for Conservation Educators and Practitioners. Synthesis. American Museum of Natural History. Available at <http://ncep.amnh.org>.

Peñuelas, J. y M. Boada. 2003. A global change-induced biome shift in the Montseny mountains (NE Spain). *Global Change Biology* 9:131-140.

Phillips, S.J., R.P. Anderson y R.E. Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modeling* 190: 231-259.

Pitelka, L.F., R.H. Gardner, J. Ash, S. Berry, H. Gitay, I.R. Noble, A. Saunders, R.H.W. Bradshaw, L. Brubaker, J.S. Clark, M.B. Davis, S. Sugita, J.M. Dyer, R. Hengeveld, G. Hope, B. Huntley, G.A. King, S. Lavorel, R.N. Mack, G.P. Malanson, M. McGlone, I.C. Prentice y M. Rejmanek. 1997. Plant migration and climate change. *American Scientist* 85 (5):464–473.

Pompe, S., J. Hanspach, F. Badeck, S. Klotz, W. Thuillery I. Kühn. 2008. Climate and land use change impacts on plants distributions in Germany. *Biology Letters* 4:564-567.

Ronquist, F., J.P. Huelsenbeck. 2003. MrBayes 3: Bayesian phylogenetic inference under mixed models. *Bioinformatics* 19:1572- 574.

Sechrest, W., T.M. Brooks, G.A.B. da Fonseca, W.R. Konstant, R.A. Mittermeier, A. Purvis, A.B. Rylands y J.L. Gittleman. 2002. Hotspots and the conservation of evolutionary history. PNAS 99(4):2067-2071.

Serreze, M.C. 2009. Understanding recent climate change. Conservation Biology 24(1):10-17.

Soberon J. y A.T. Peterson 2005. Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. Biodiversity Informatics 2:1-10.

Swofford, D.L. 2003. PAUP*: Phylogenetic analysis using parsimony (* and other methods). Version 4. Sinauer Associates, Inc., Publishers, Sunderland, Massachusetts.

Thomas, D. 2010. Climate, climate change and range boundaries. Diversity and Distributions 126:488-495.

Thuiller W., S. Lavorel y M.B. Araujo. 2005. Niche properties and geographical extent as predictors of species sensitivity to climate change. Global Ecology and Biogeography 14:347-357.

Trivedi, M.R., M.D. Morecroft, P.M. Berry T.P. Dawson. 2008. Potential effects of climate change on plant communities in three montane nature reserves in Scotland, UK. *Biological Conservation* 141:1665-1675.

Vittoz P. y R. Engler. 2007. Seed dispersal distances: a typology based on dispersal modes and plant traits. *Botanica Helvetica* 117:109–124.

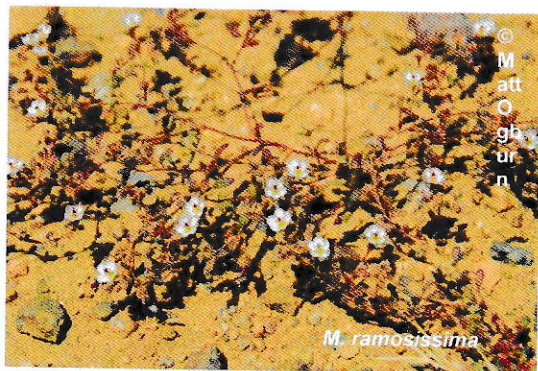
van der Pijl, L. 1982. *Principles of Seed Dispersal in Higher Plants*, 3rd edición. Springer-Verlag, Berlin.

Walther, G.R. 2003. Plants in a warmer world. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* 6(3):169-185.

Walther, G.R., S. Beibnery C.A. Burga. 2005. Trends in the upward shift of alpine plants. *Journal of Vegetation Science* 16:541-548.

Williams, J.W., S.T. Jackson y J.E. Kutzbach. 2007. Projected distributions of novel and disappearing climates by 2100 AD. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104(14):5738-574

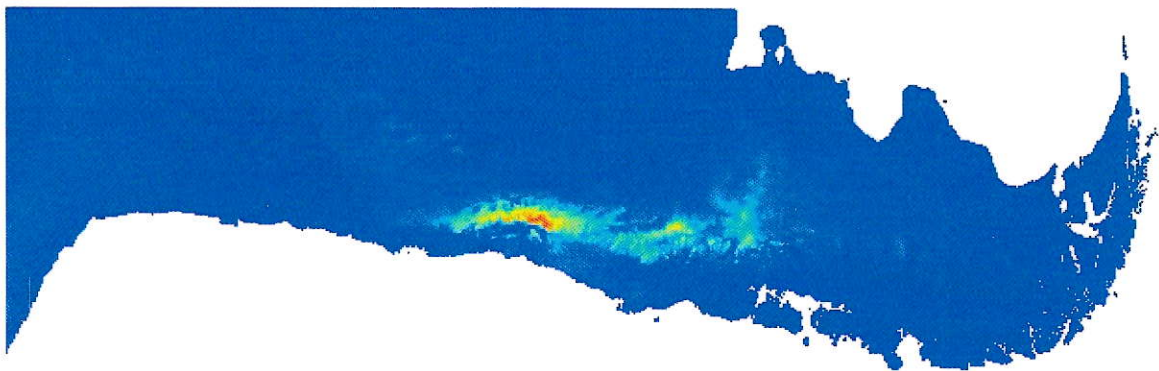
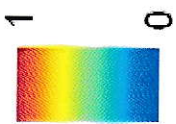
Anexo 1. Fotografías de algunas especies de *Montiopsis*



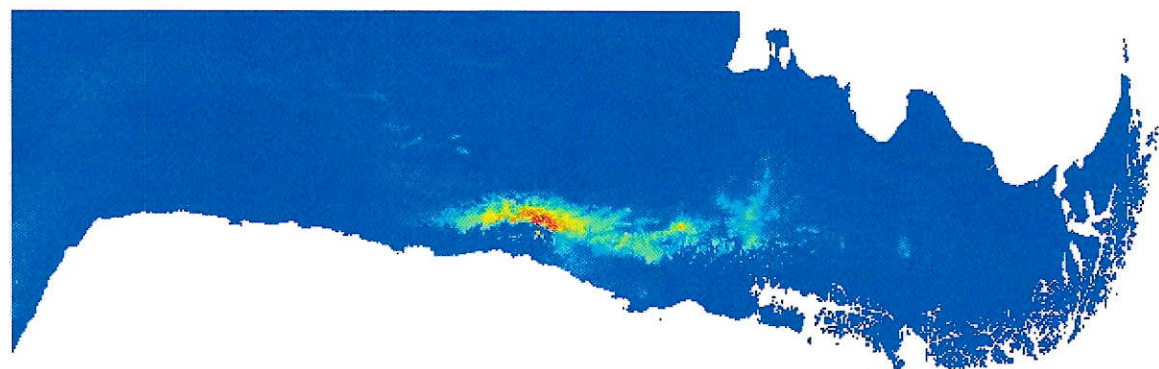
Anexo2. Mapas de distribución actual y futura del género *Montiopsis*

M. andicola

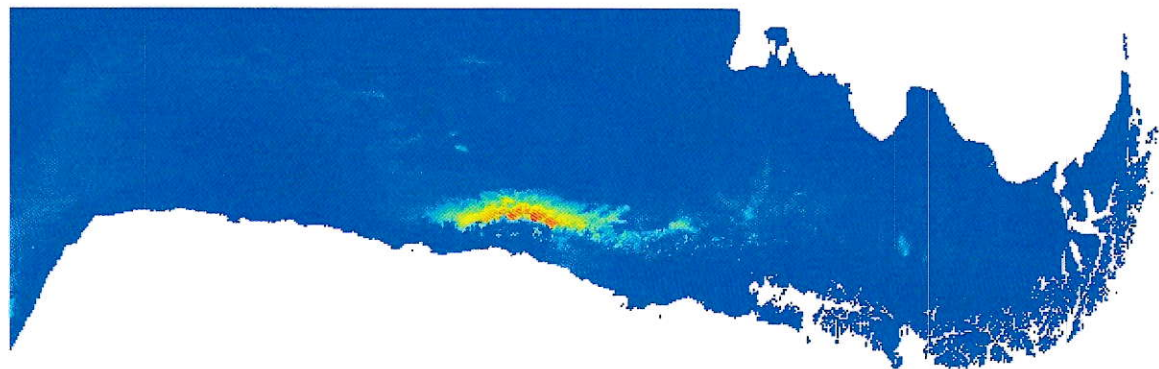
Probabilidad
de presencia



A2



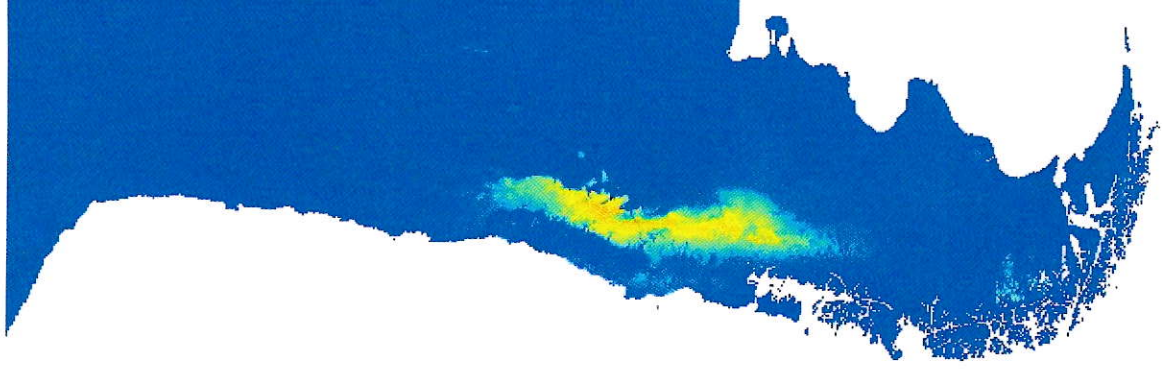
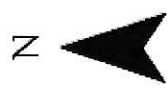
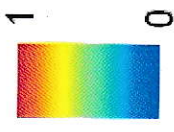
B2



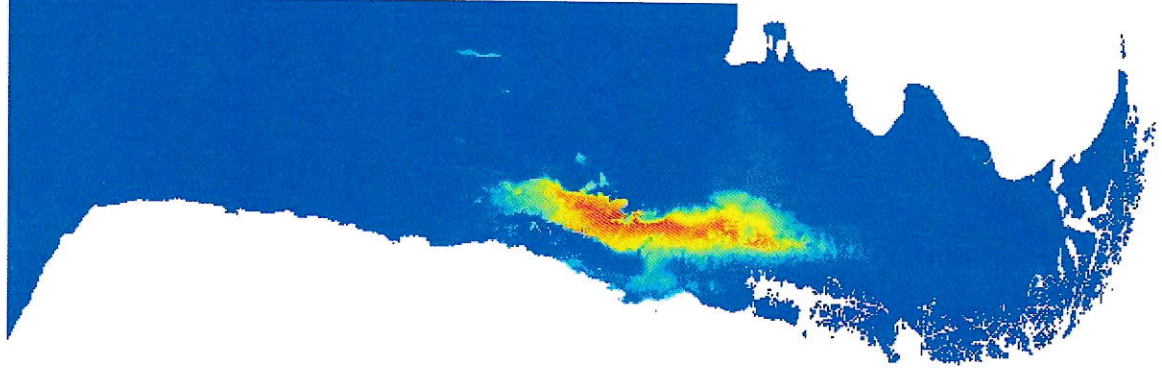
Actual

M. berteriana

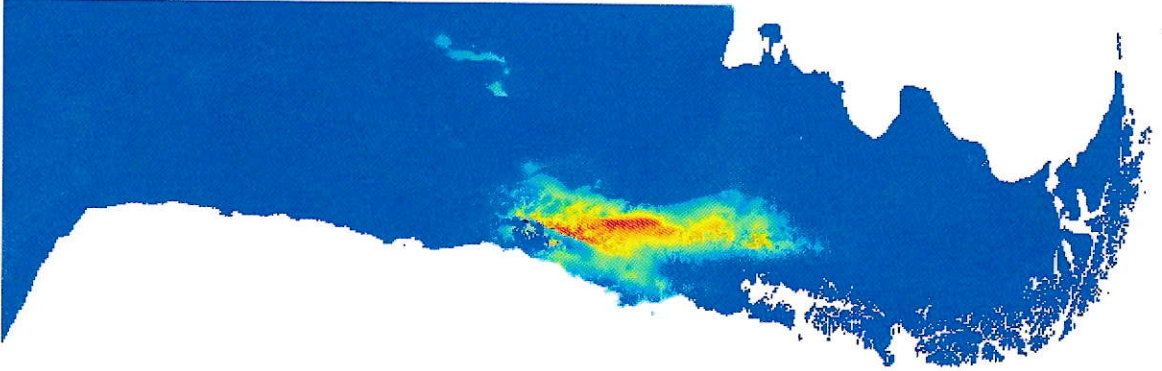
Probabilidad
de presencia



A2



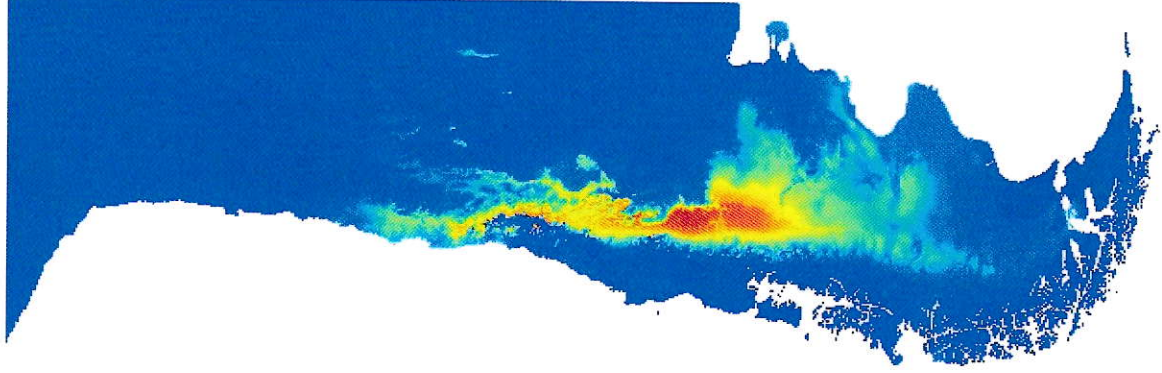
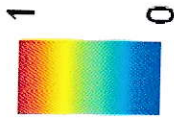
B2



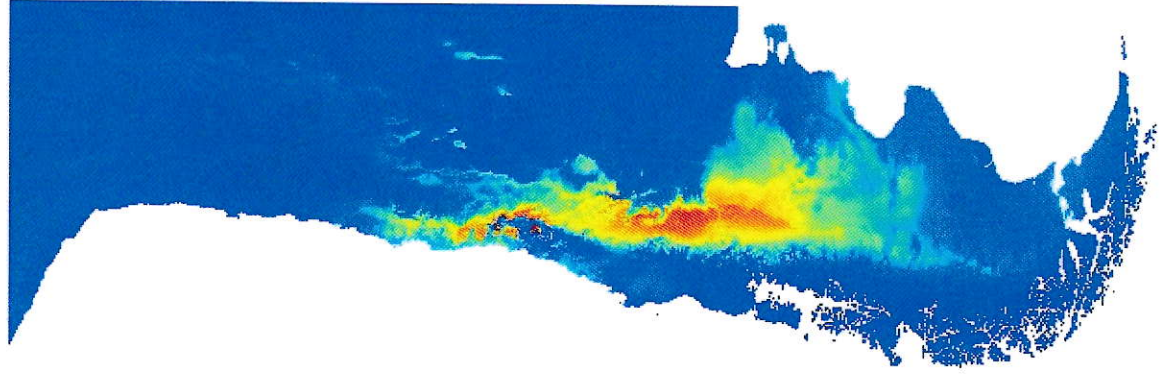
Actual

M. capitata

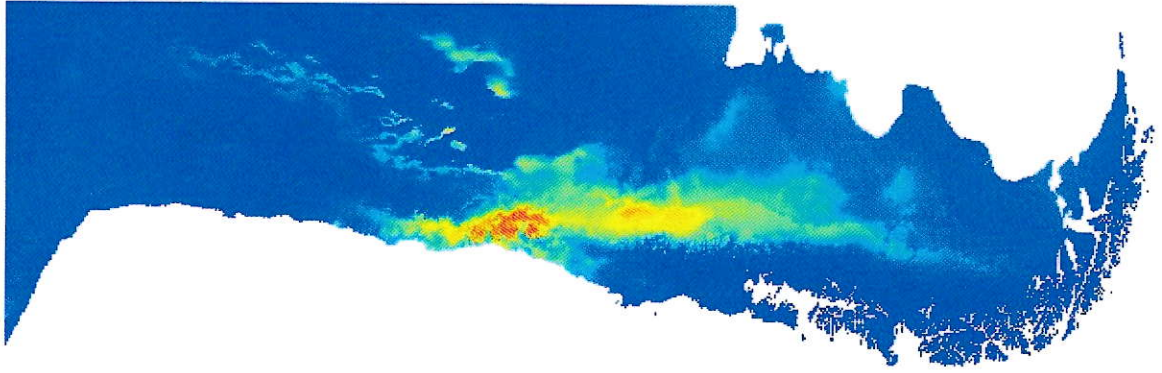
Probabilidad de presencia



A2



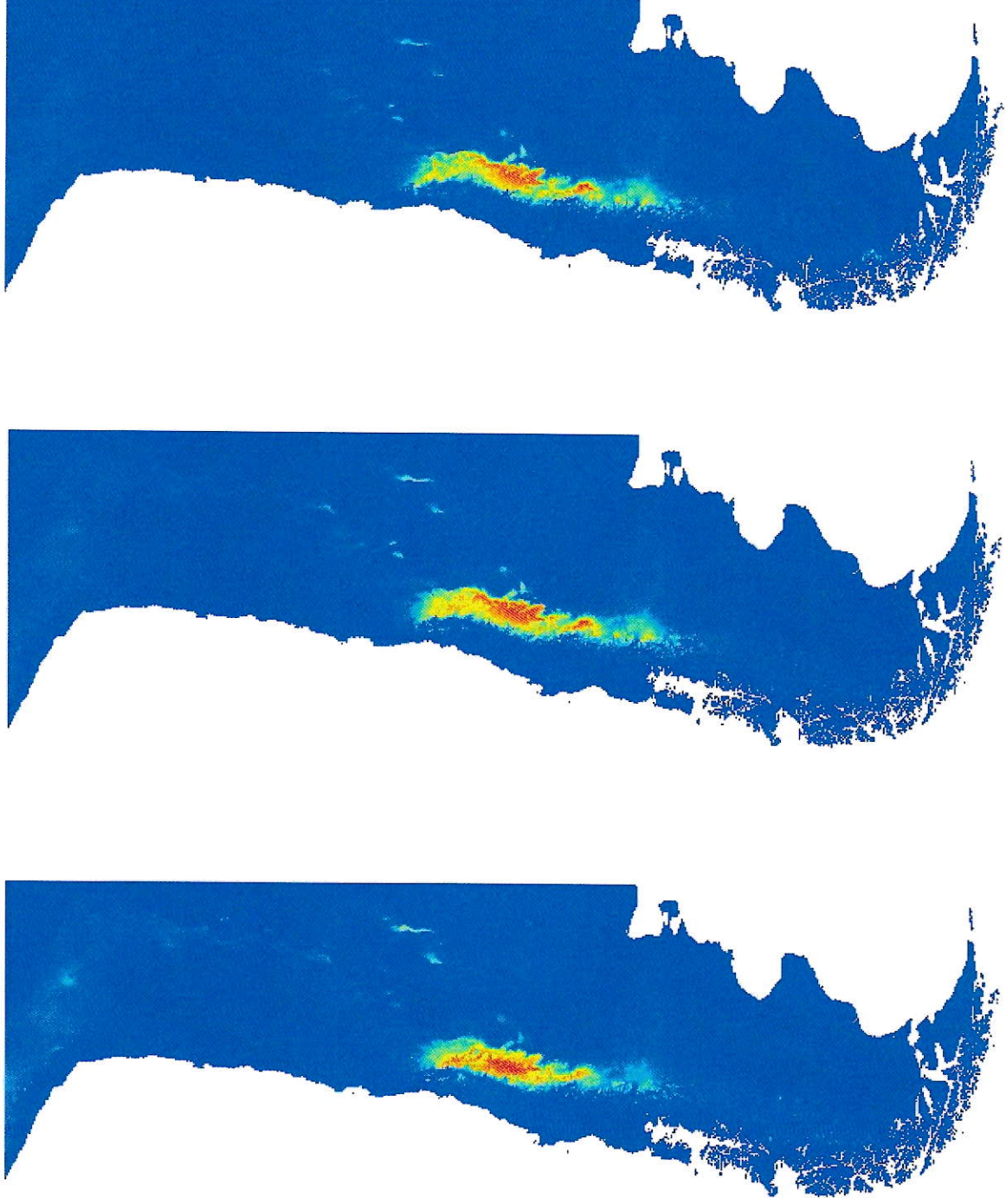
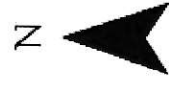
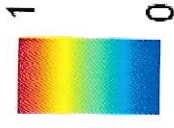
B2



Actual

M. cistiflora

Probabilidad
de presencia



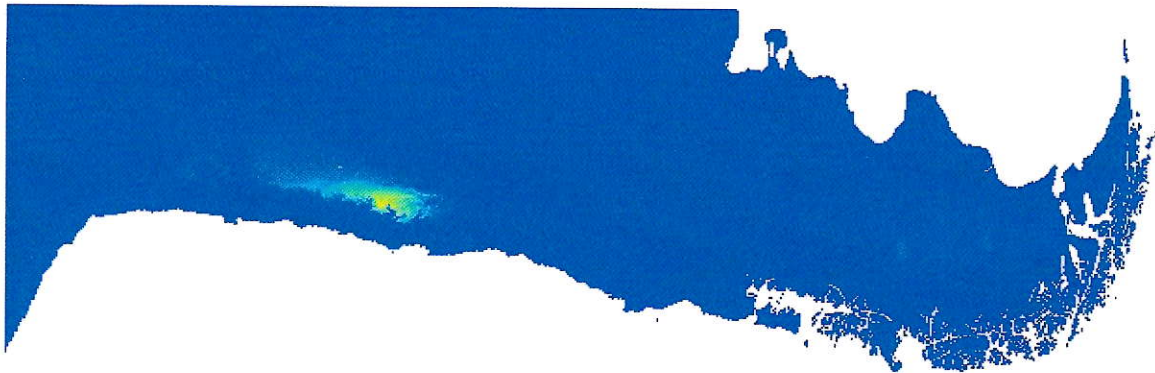
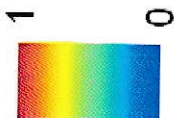
A2

B2

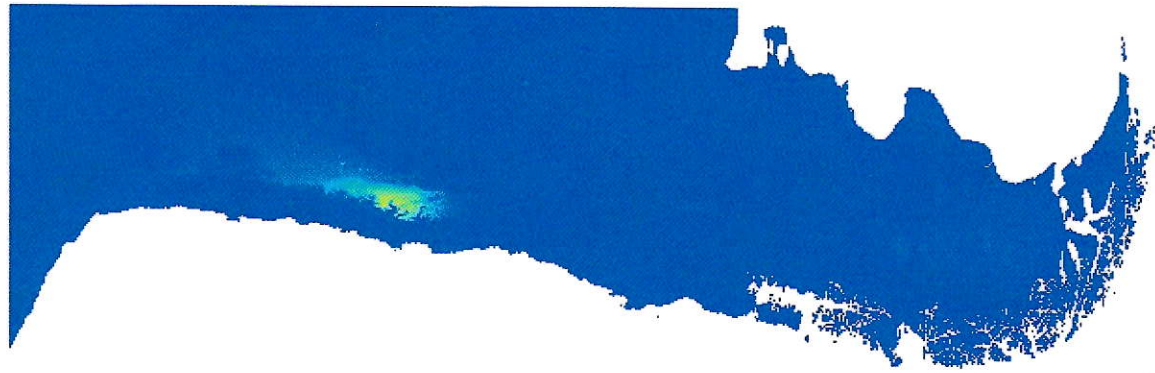
Actual

M. copiapina

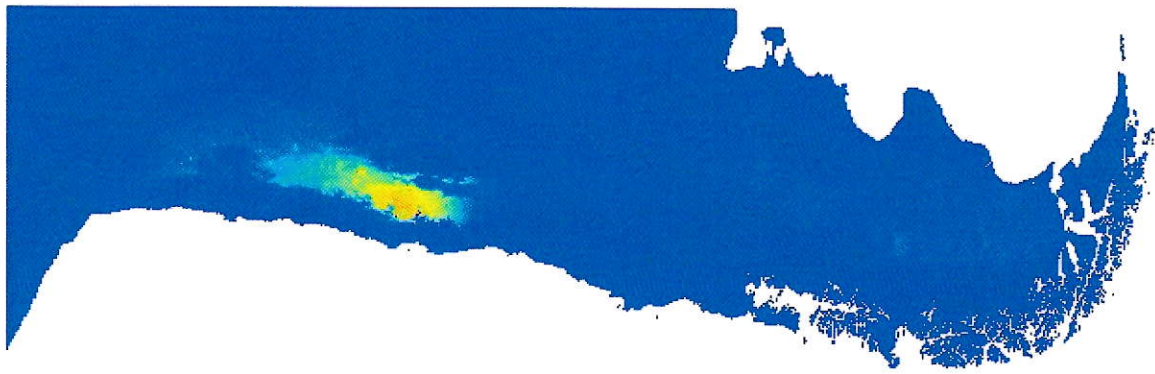
Probabilidad
de presencia



A2



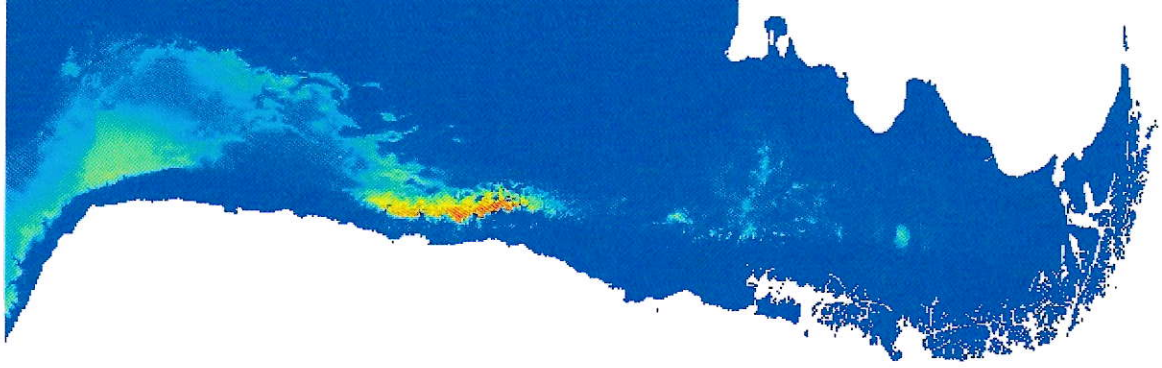
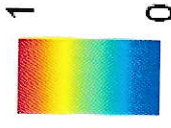
B2



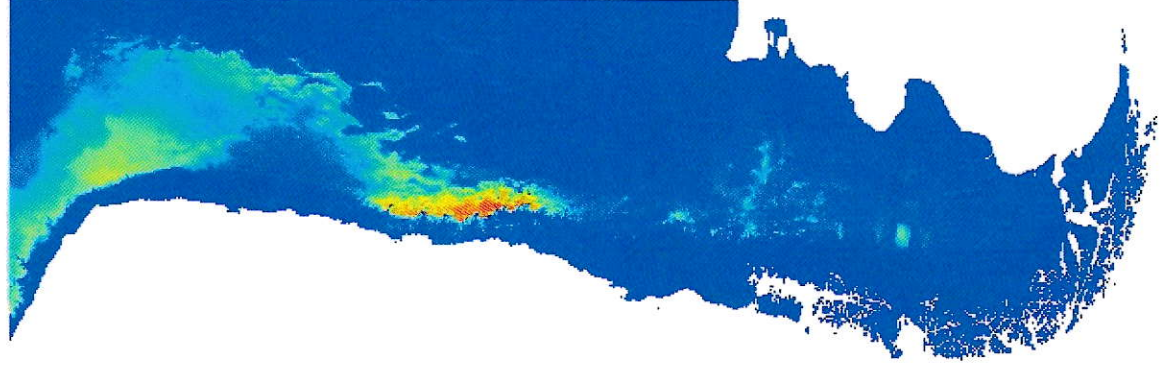
Actual

M. cumingii

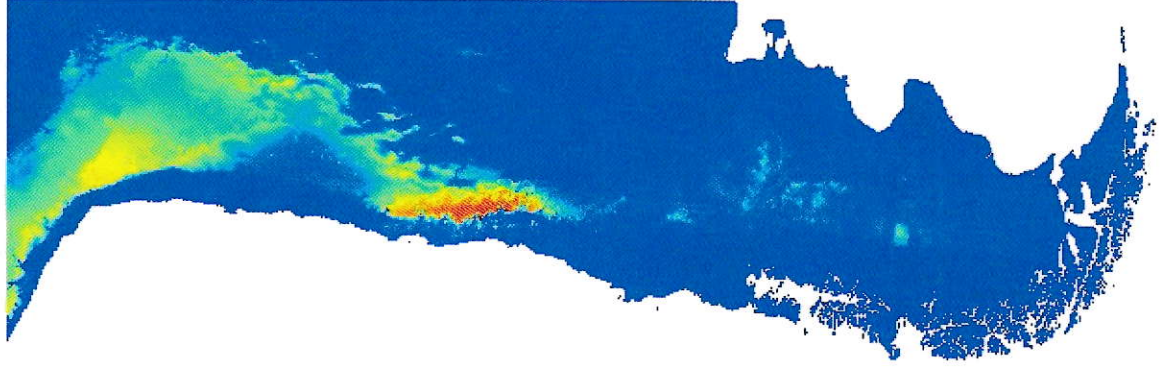
Probabilidad
de presencia



A2



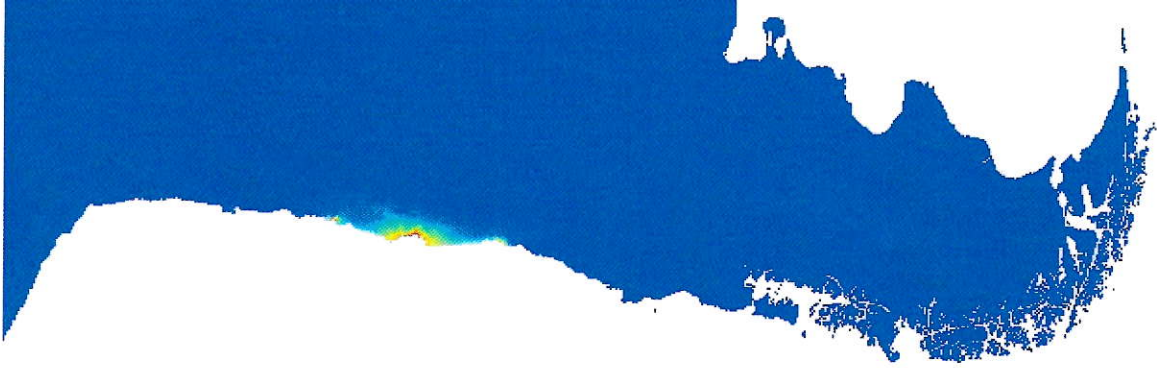
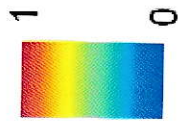
B2



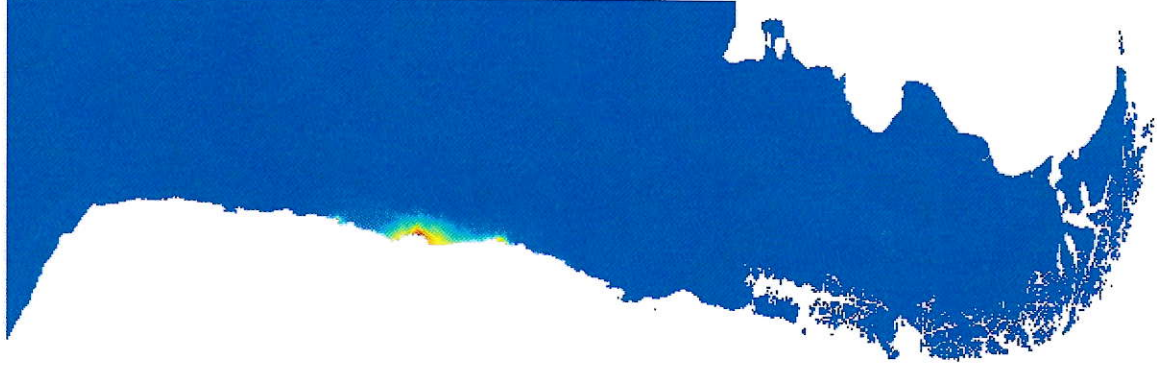
Actual

M. demissa

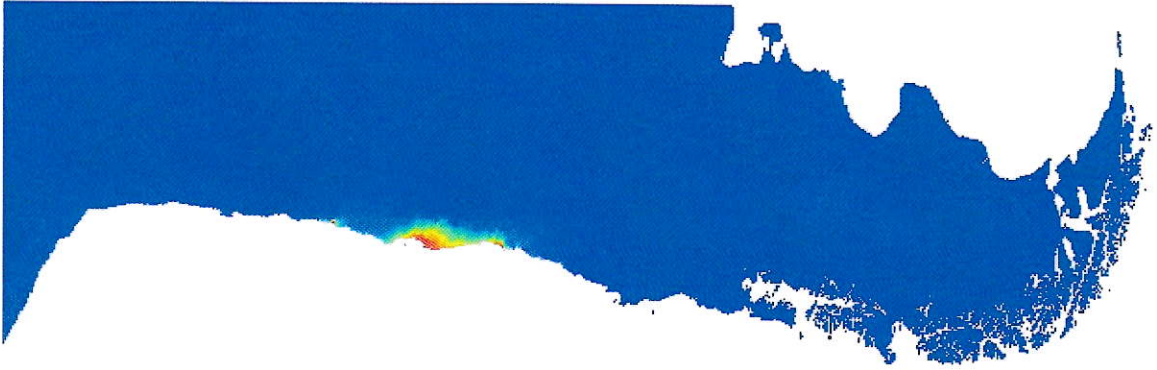
Probabilidad
de presencia



A2

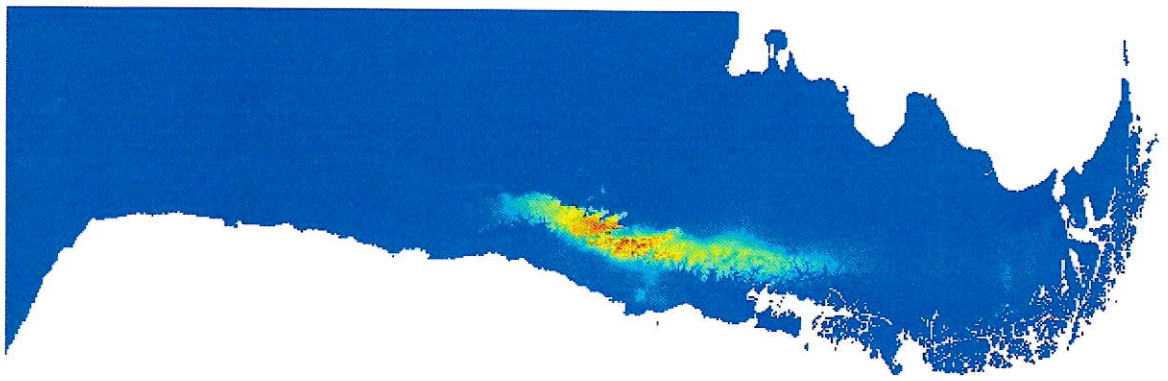
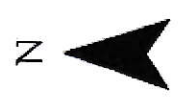
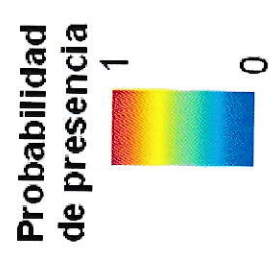


B2

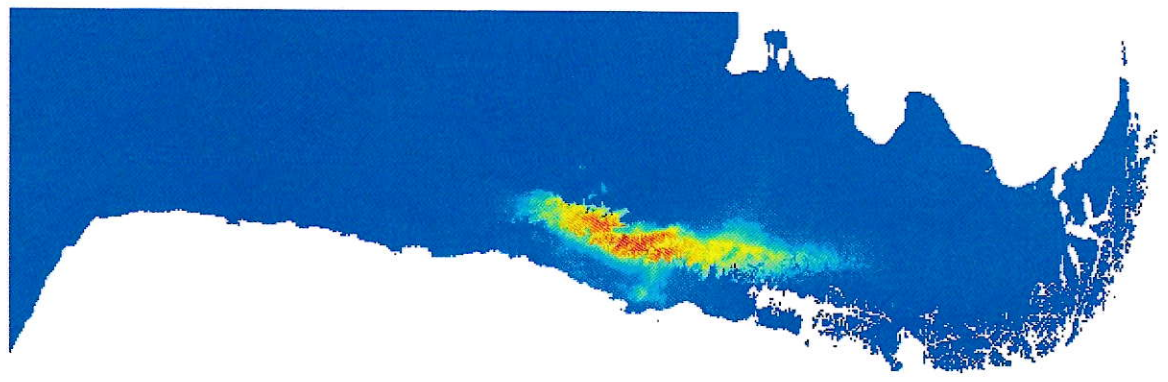


Actual

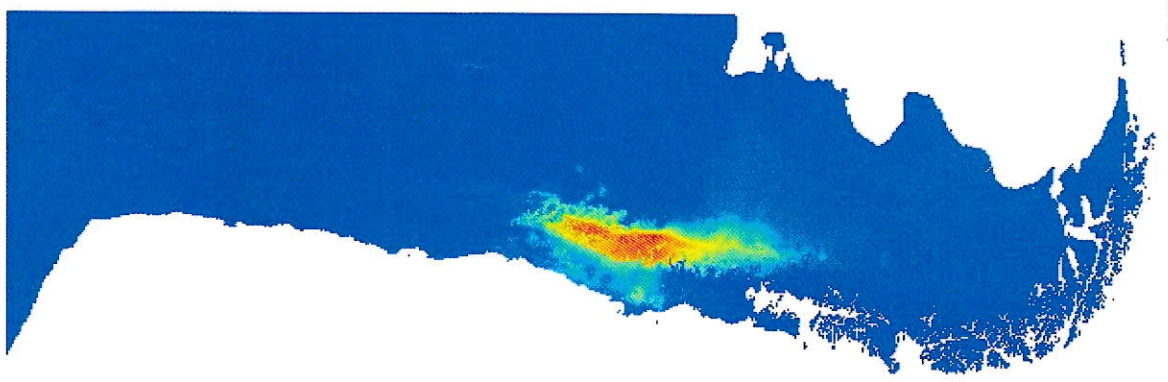
M. gayana



A2



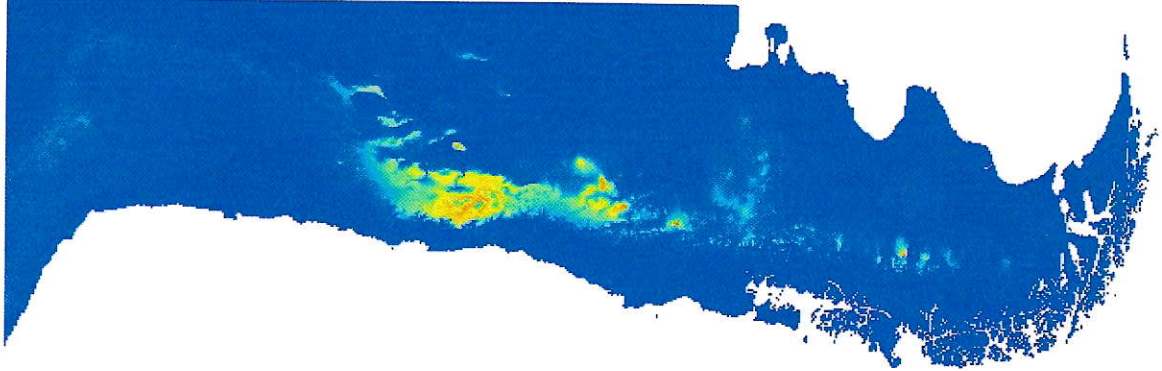
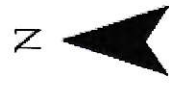
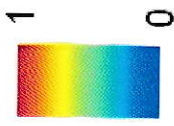
B2



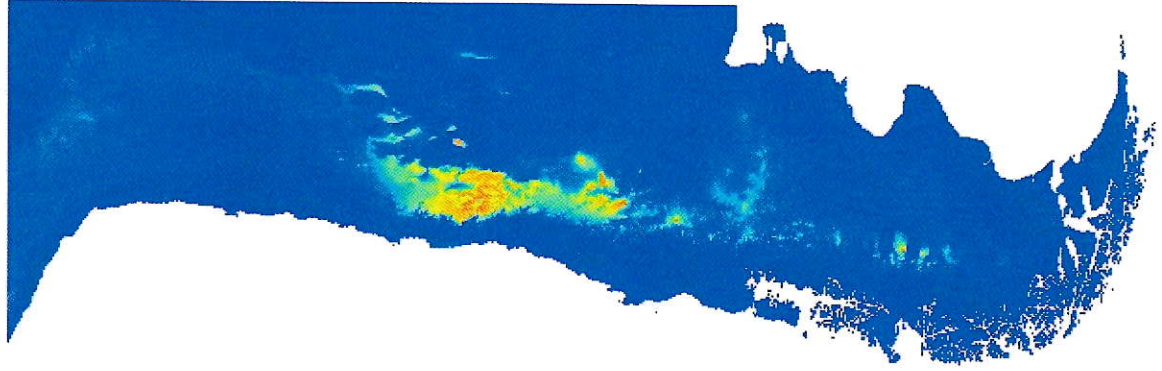
Actual

M. gilliesii

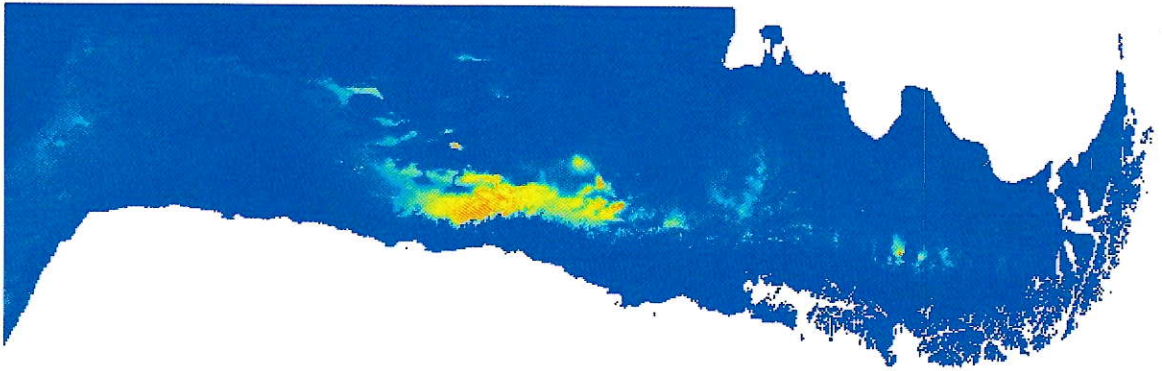
Probabilidad de presencia



A2



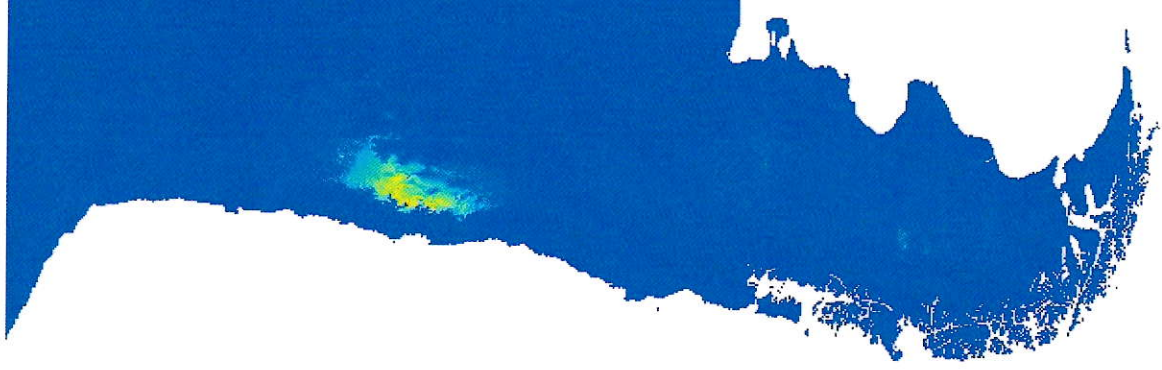
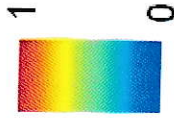
B2



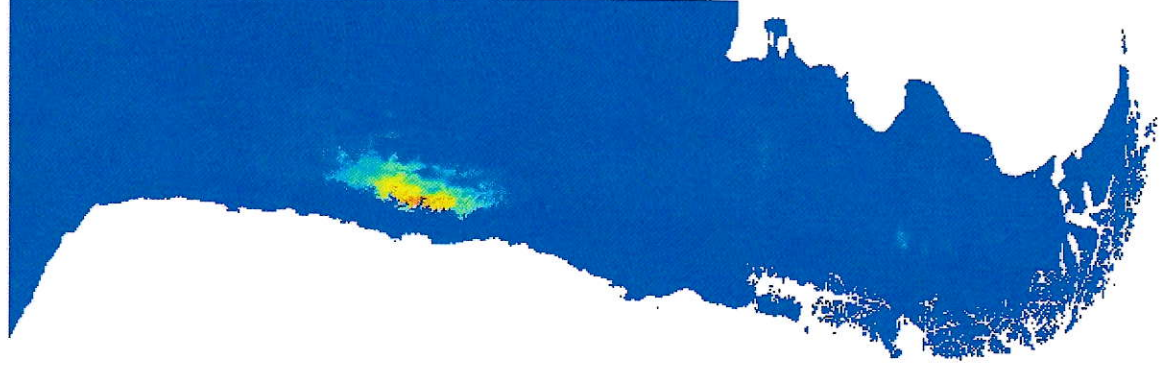
Actual

M. glomerata

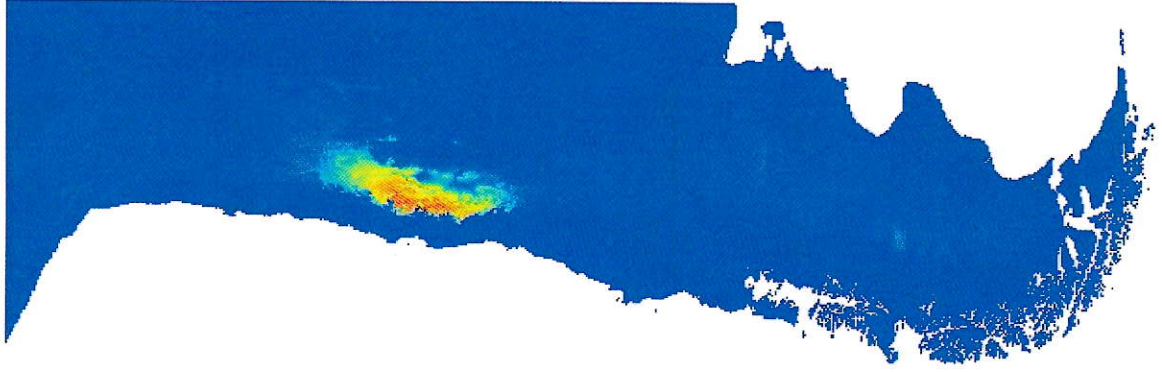
Probabilidad
de presencia



A2



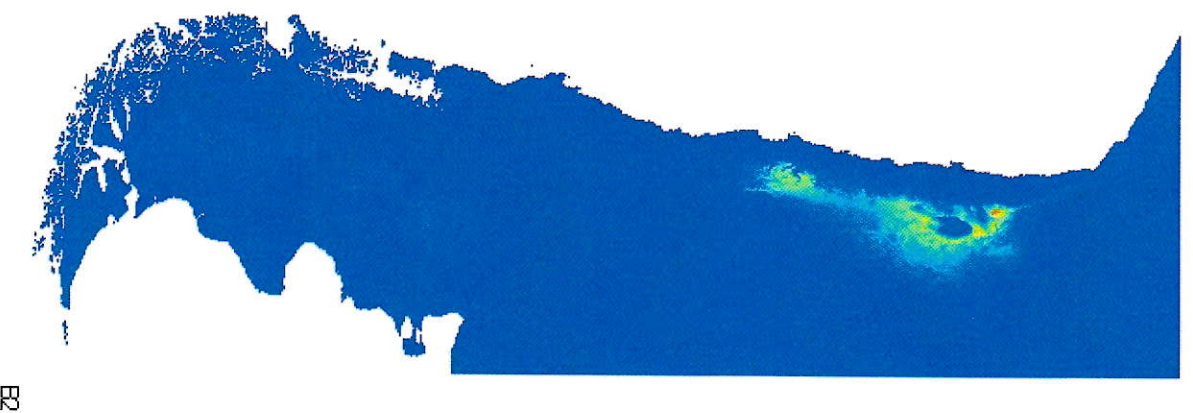
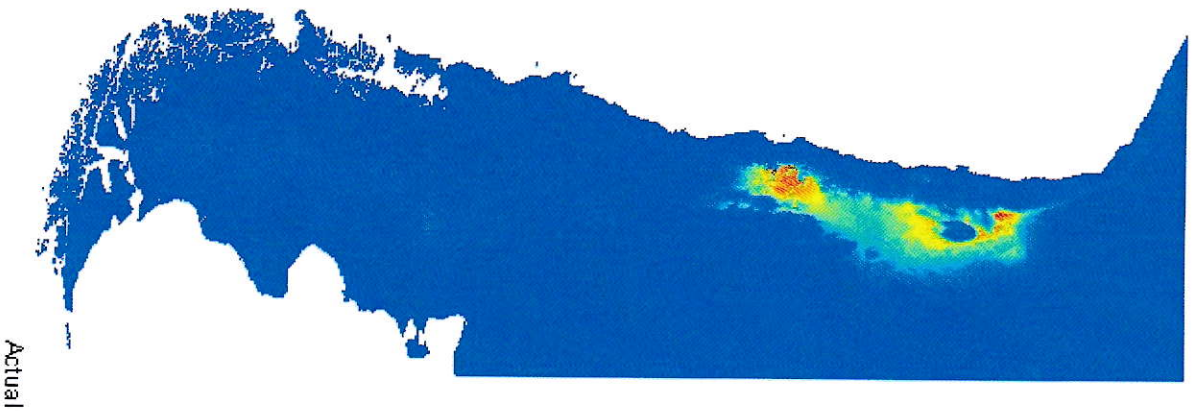
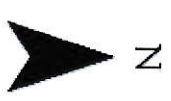
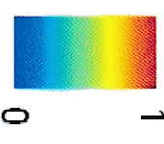
B2



Actual

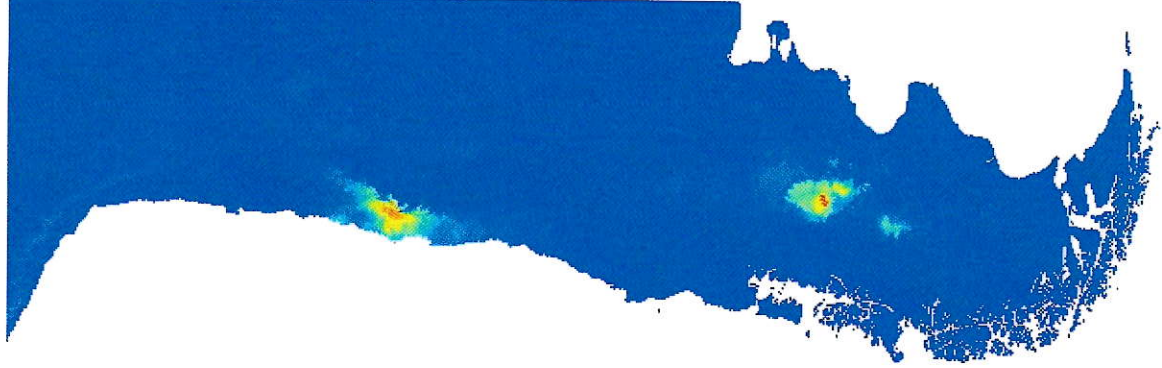
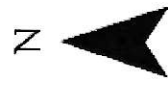
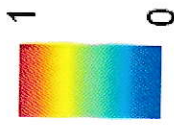
M. modesta

Probabilidad
de presencia

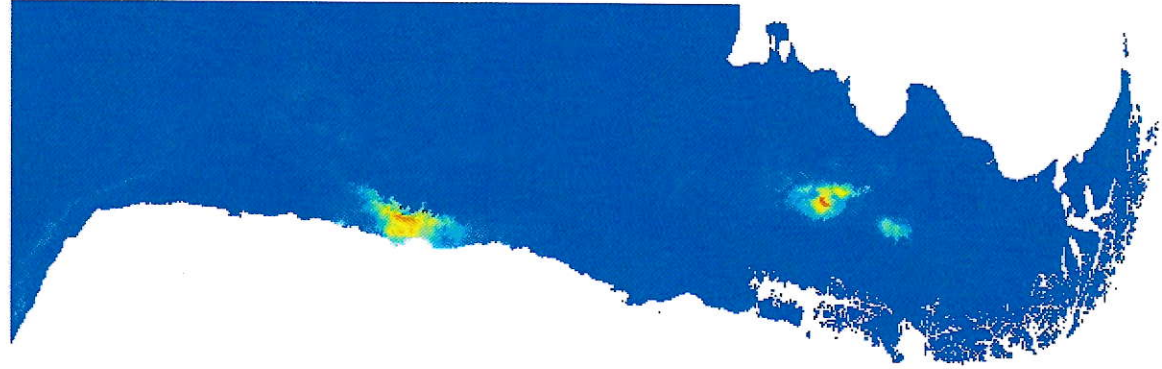


M. parviflora

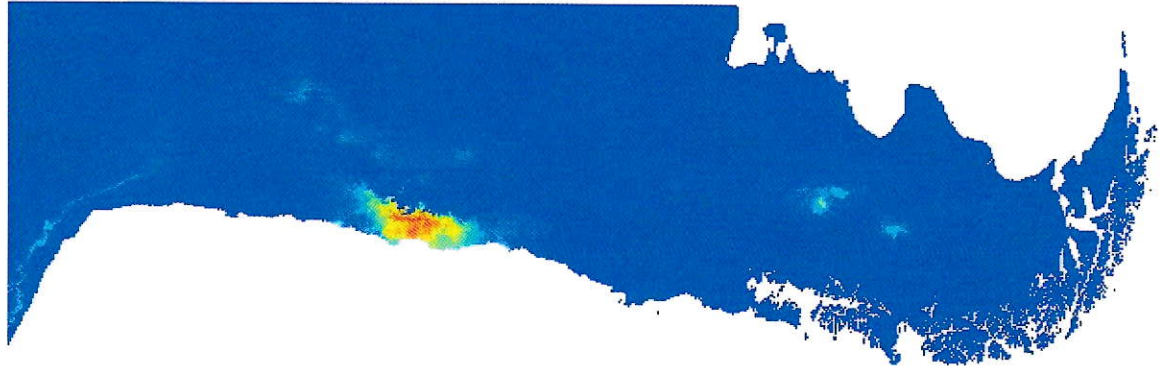
Probabilidad
de presencia



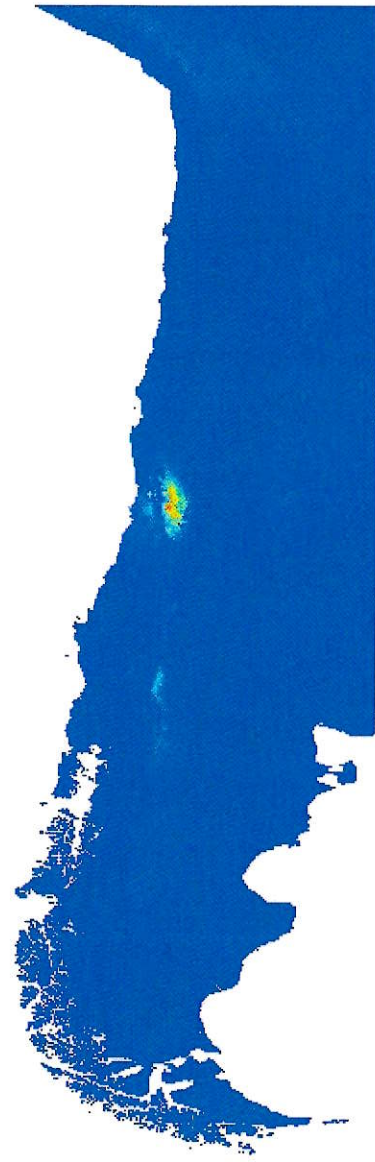
A2



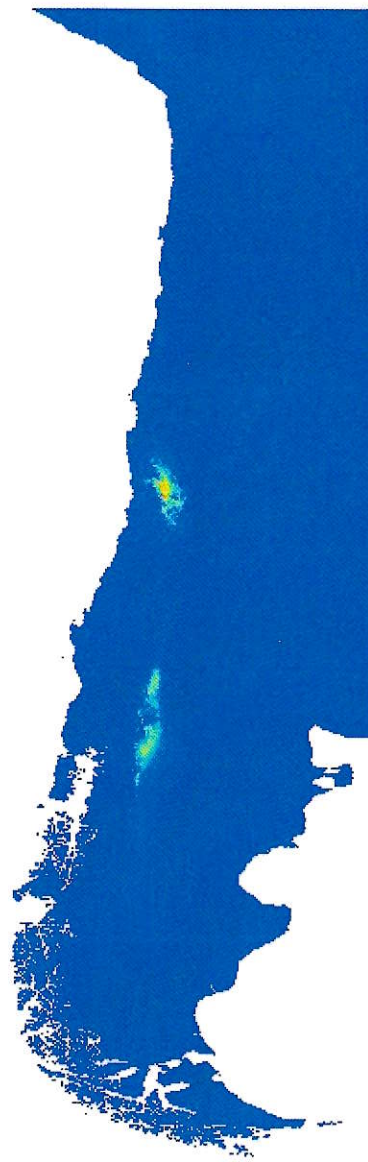
B2



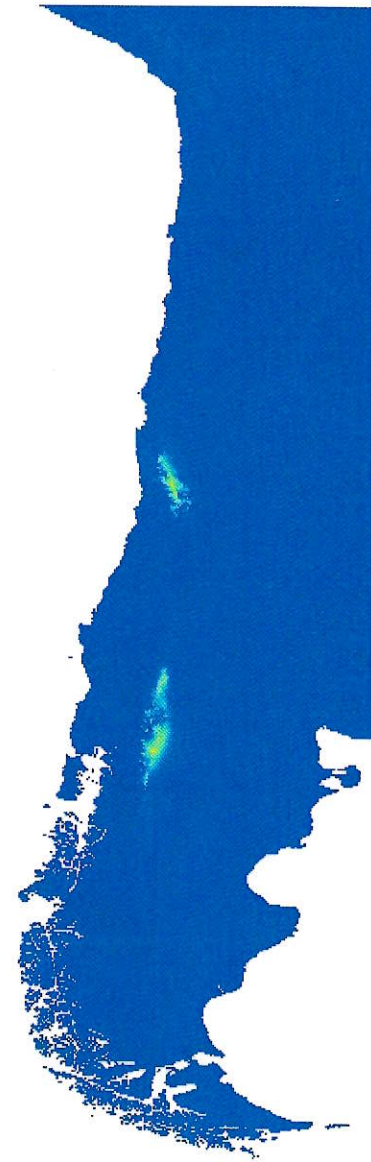
Actual



Actual

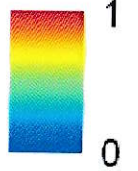


B2

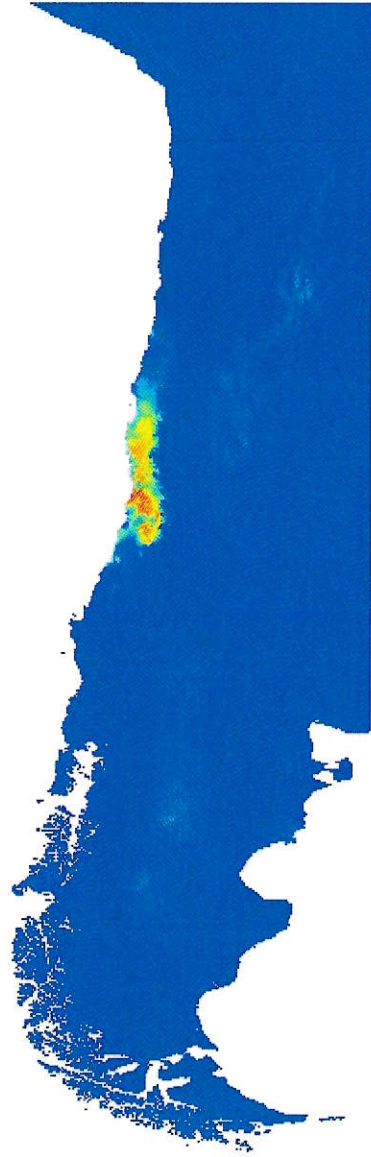


M. potentilloides

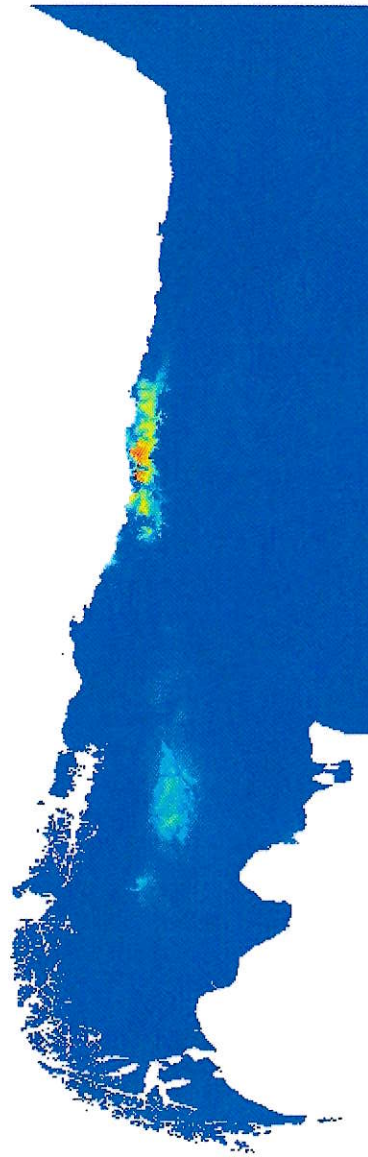
Probabilidad
de presencia



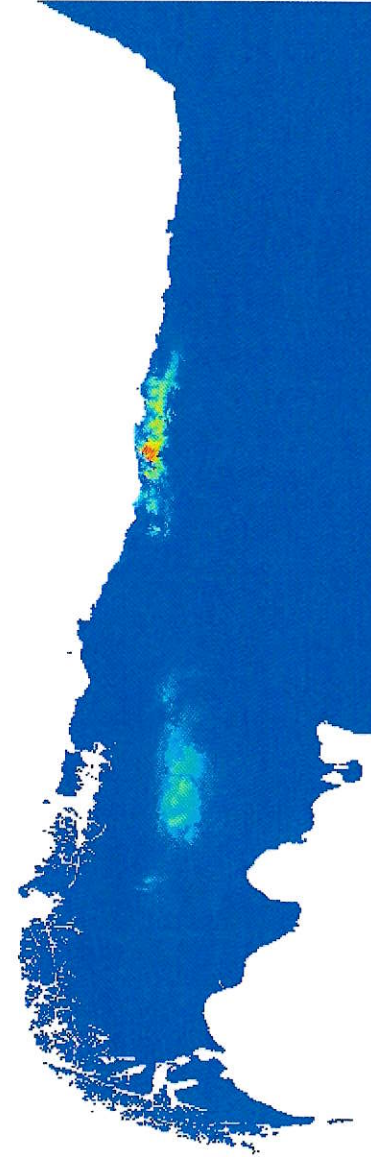
A2



Actual

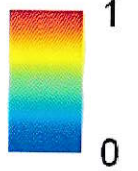


E2



M. ramosissima

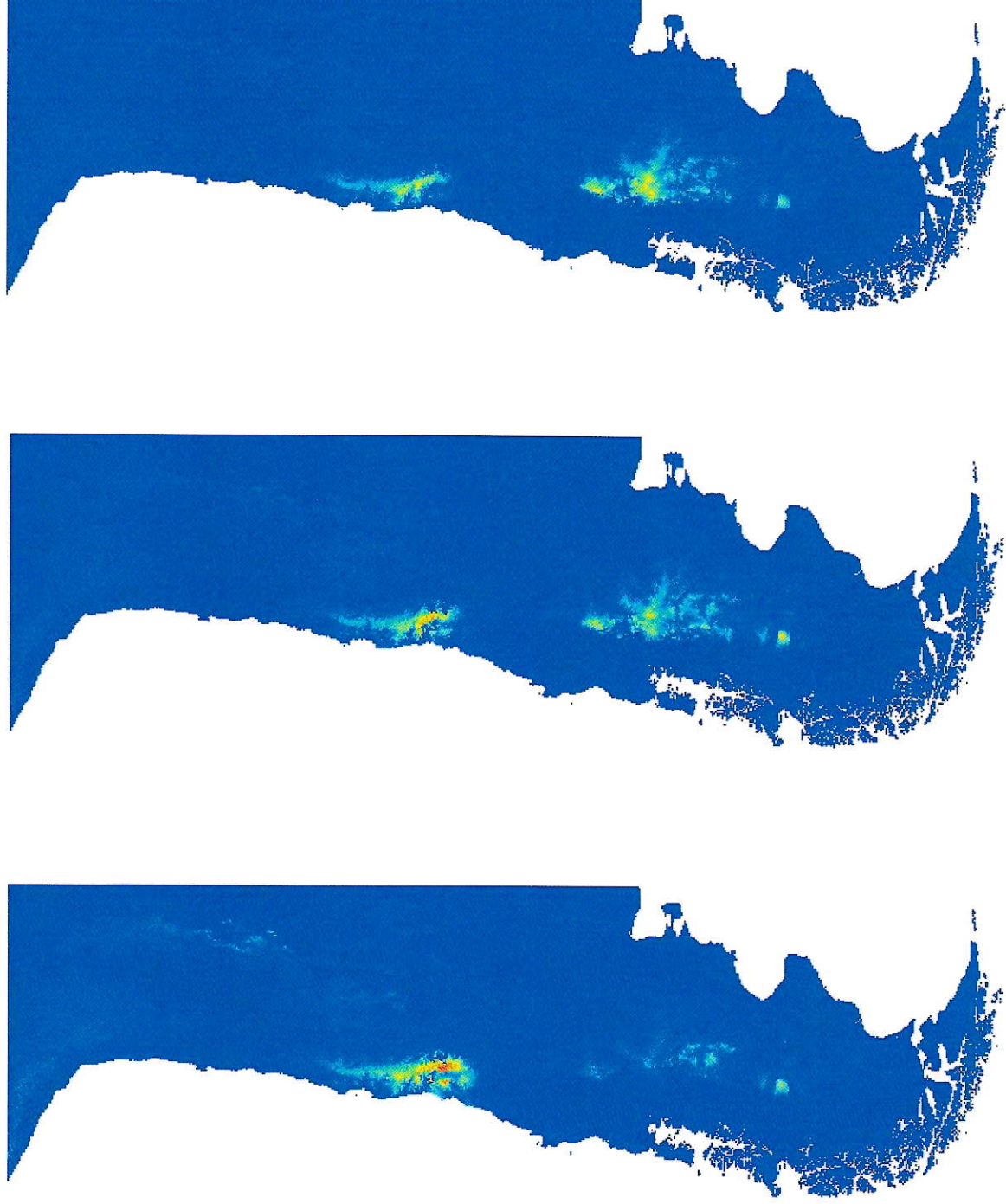
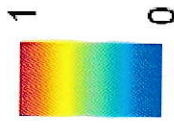
Probabilidad
de presencia



A2

M. sericea

Probabilidad de presencia



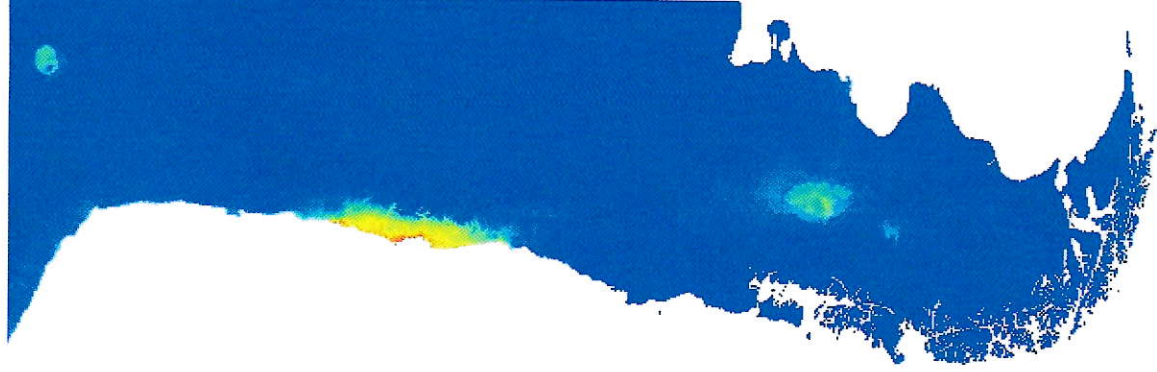
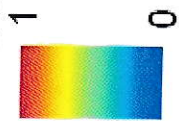
A2

B2

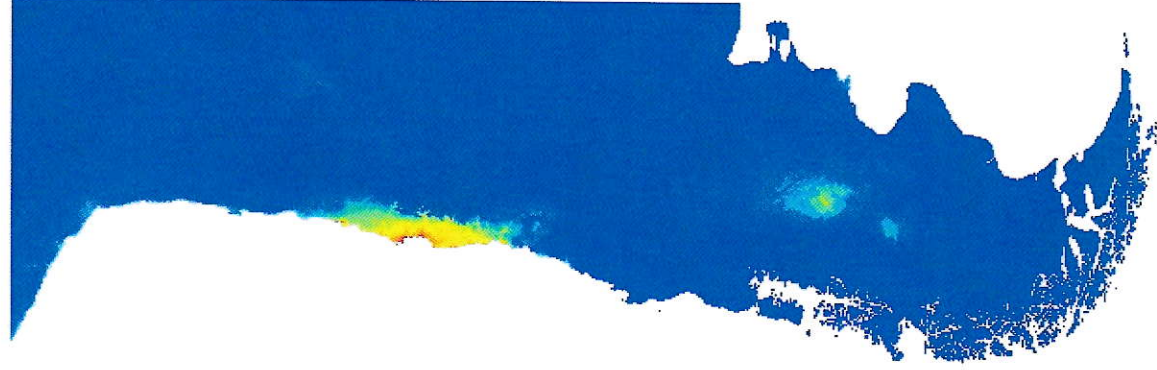
Actual

M. trifida

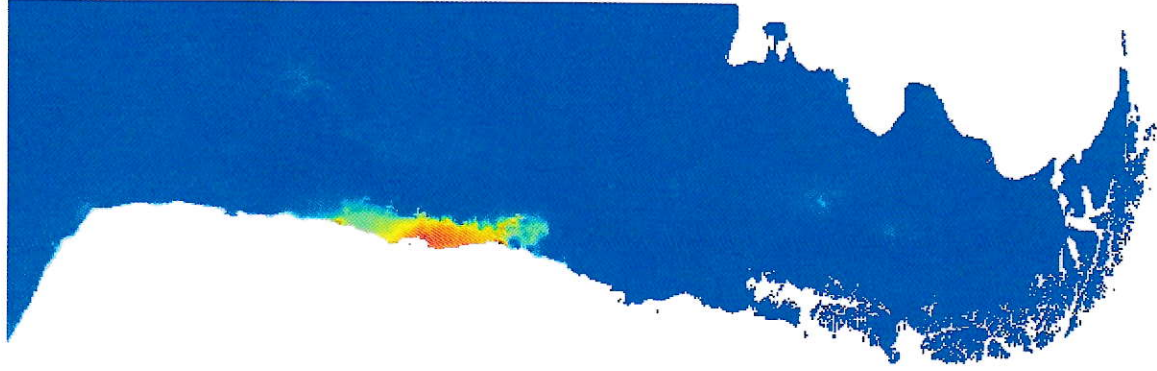
Probabilidad
de presencia



A2



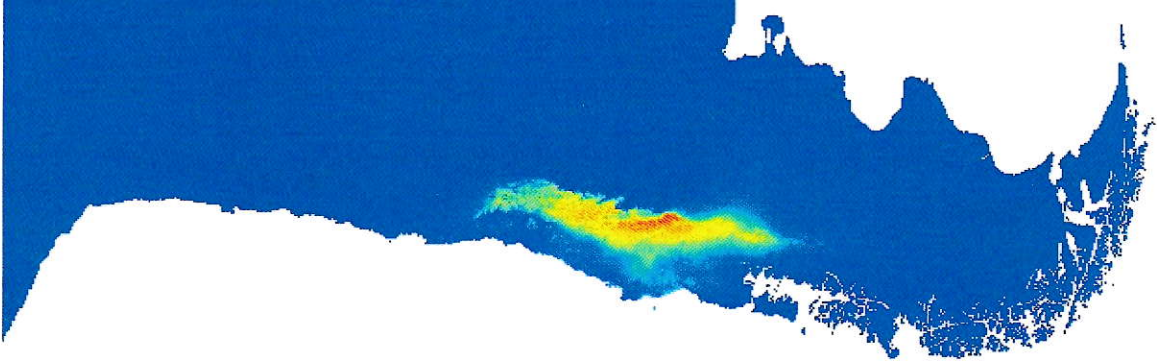
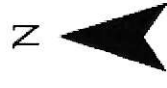
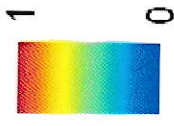
B2



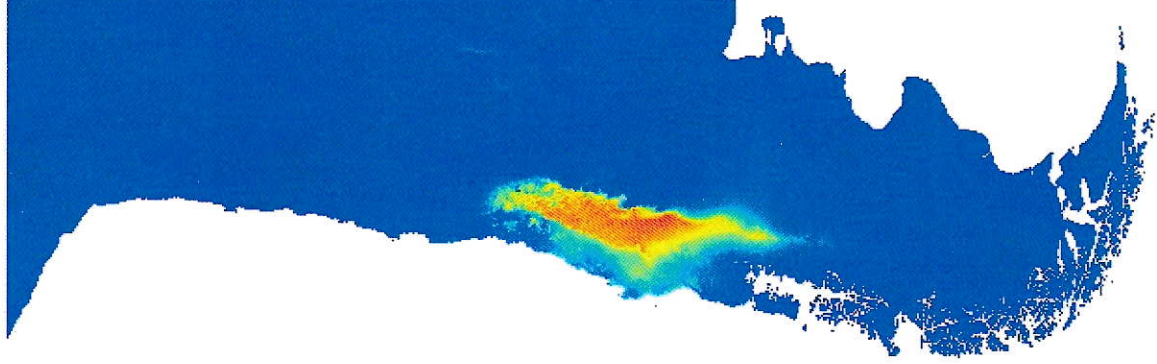
Actual

M. umbellata

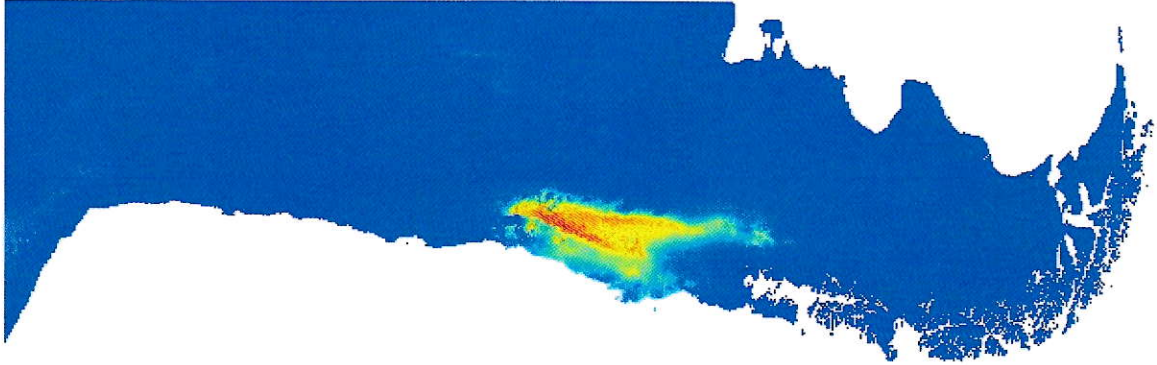
Probabilidad de presencia



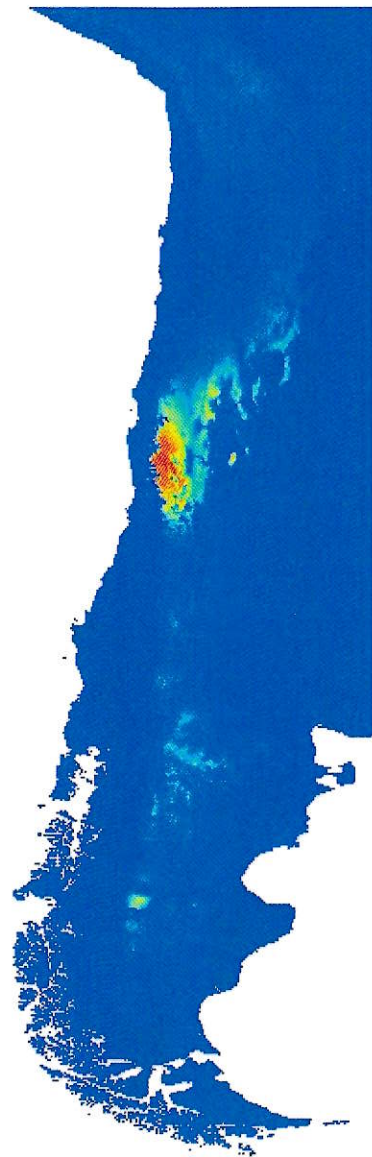
A2



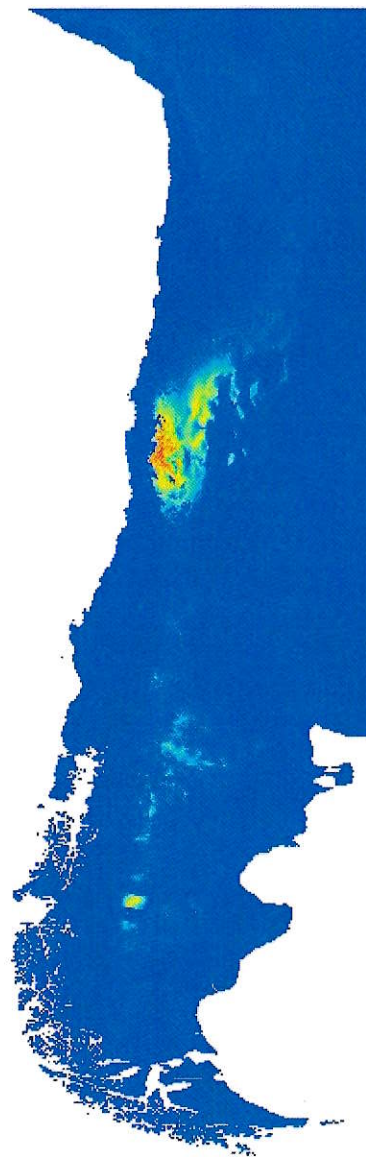
B2



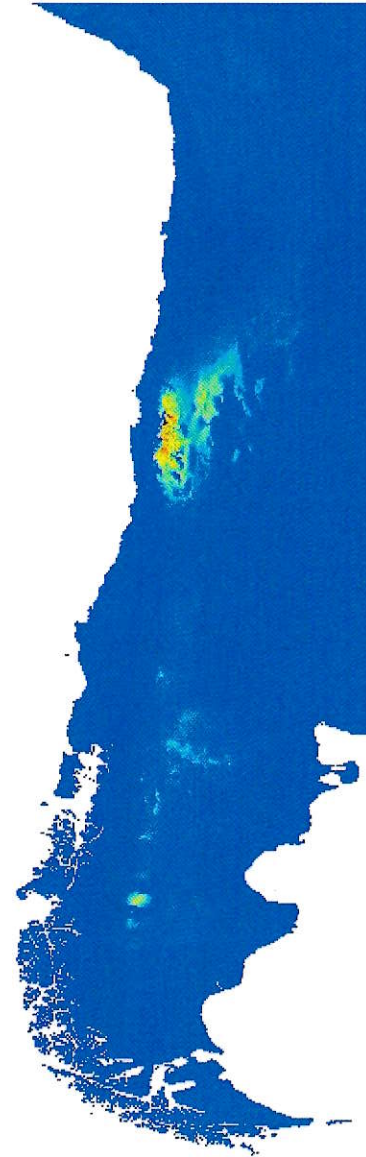
Actual



Actual

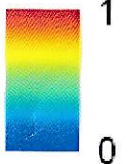


B2



M. uspallatensis

Probabilidad
de presencia



N

