



**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y DE LA**  
**CONSERVACION DE LA NATURALEZA**  
**ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES**  
**DEPARTAMENTO DE GESTIÓN FORESTAL Y SU MEDIO**  
**AMBIENTE**

---

**DISTRIBUCIÓN ACTUAL Y POTENCIAL DE LA MICROALGA**  
***Didymosphenia geminata* (Lyngbye) Schmidt EN CHILE.**

Memoria para optar al Título  
Profesional de Ingeniero Forestal

**WILSON ALEXANDER MEJÍAS CABALLERO**

Profesor Guía: Sra. Matilde María López. Profesora de Biología y Ciencias,  
M.Sc. en Ecología, Dra.en Ciencias Sociales y Políticas

---

Santiago, Chile  
2017

**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y DE LA  
CONSERVACION DE LA NATURALEZA  
ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES  
DEPARTAMENTO DE GESTIÓN FORESTAL Y SU MEDIO  
AMBIENTE**

**DISTRIBUCIÓN ACTUAL Y POTENCIAL DE LA MICROALGA  
*Didymosphenia geminata* (Lyngbye) Schmidt EN CHILE.**

Memoria para optar al Título  
Profesional de Ingeniero Forestal

**WILSON ALEXANDER MEJÍAS CABALLERO**

Calificaciones:	Nota	Firma
Prof. Guía Sra. Matilde María López	6.5	.....
Prof. Consejero Sr. Miguel Eduardo Castillo	7.0	.....
Prof. Consejero Sr. Sergio Cabrera Silva	6.0	.....

*«Una lección sin dolor no tiene sentido.  
Eso es porque no se puede ganar algo sin sacrificar algo a cambio.  
Sin embargo, una vez que hayas soportado el dolor y lo hayas superado, ganarás un  
corazón que es más fuerte que todo lo demás.  
Así es, un corazón de acero».*

*A Georgina Vásquez*

*Gracias por todo*

## AGRADECIMIENTOS

Esta memoria de título pone fin a un proceso iniciado ya hace algún tiempo y solo puedo estar en esta instancia gracias al apoyo de muchas personas.

Antes de todo, quiero agradecer a mi profesora guía Matilde López, quien sin conocerme confió en mí y me dio la oportunidad de llevar a cabo este proyecto brindándome todo el apoyo que necesite durante este proceso.

A mis profesores consejeros y a los docentes de la Universidad de Chile quienes me entregaron herramientas y conocimientos para ser un buen profesional.

A mi familia que siempre me apoyo y creyó en mí, incluso cuando yo no lo hacía. Agradecer a mi madre, que ha sido mi principal soporte en la vida y quien me guio a ser quien soy. A mis queridos hermanos Madelaine, Michelle, Nayaret, Nicolás, Victoria, Javier e Indira, a quienes amo muchísimo. Agradecer a mis abuelos y tíos, por todo el apoyo y comprensión que me han brindado.

A mis queridos amigos que me acompañaron en este sendero Vanessa, Nathalie, Nathaly, Fernando, Manuel, Ítalo, Álvaro, Sebastián, Alejandro, María José y David.

A mis queridos amigos que conocí en esta hermosa carrera Constanza, Francisco, Catalina, Nicole, Catalina, Gabriela, Danira, y Camila.

A mi gran amigo Daniel Zamorano, quien me enseñó y me guio en estadística y ecología.

A mis excompañeros de AMAKAIK quienes me apoyaron y me inspiraron a realizar este trabajo.

Por último a Georgina, quien fue una luz en mi vida.

## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. OBJETIVOS .....	4
2.1. Objetivo general.....	4
2.2. Objetivos específicos .....	4
3. MATERIAL Y MÉTODO .....	5
3.1. Material.....	5
3.2. Método.....	7
3.2.1. Procesamiento inicial de la información.....	7
3.2.2. Selección de variables.....	8
3.2.3. Modelamiento.....	8
3.2.4. Análisis de importancia de las variables.....	9
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	10
4.1. Información Inicial .....	10
4.2. Selección de las variables .....	11
4.3. Modelamiento de la distribución .....	13
4.3.1. Resultados generales del modelo.....	13
4.3.2. Análisis de importancia de las variables.....	17
4.2.3 Prueba “Jack knife” .....	18
4.4. Relación de las variables y la probabilidad de presencia .....	19
5. CONCLUSIONES .....	23
6. BIBLIOGRAFÍA .....	24

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Presencias de <i>Didymosphenia geminata</i> en Chile. ....	10
Figura 2: Análisis de correlación múltiple para variables ambientales. Eje vertical corresponde al índice de correlación de Spearman. ....	11
Figura 3: Gráfico de sedimentación para varianza explicada por cada uno de los componentes principales. ....	12
Figura 4: Análisis de componentes principales para variables ambientales. ....	13
Figura 5: Curvas operador receptor (ROC) de Modelo MAXENT para modelo ponderado de <i>D. geminata</i> . ....	14
Figura 6: Distribución potencial de <i>Didymosphenia geminata</i> en Chile. ....	16
Figura 7: Análisis “Jack knife” para variables ambientales del modelo MAXENT. ....	18
Figura 8: Curvas de respuesta de variables ambientales de modelos compuestos. . A) Precipitación del mes más seco. B) Acumulación de Flujo. C) Estacionalidad de la temperatura. D) Evapotranspiración. ....	19
Figura 9: Curvas de respuesta de variables ambientales de modelos individuales. A) Precipitación del mes más seco. B) Acumulación de Flujo. C) Estacionalidad de la temperatura. D) Evapotranspiración. ....	20
Figura 10: Respuesta de variable composición geológica. ....	21
Figura 11: Respuesta de variable uso de suelo. ....	22

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Variables usadas en la modelación.....	5
Cuadro 2: Variables bioclimáticas de WorldClim. ....	6
Cuadro 3 : Clasificación variable Uso de suelo. ....	7
Cuadro 4 : Clasificación variable Composición geológica. ....	8
Cuadro 5: Áreas por región con mayor probabilidad de presencia de Didymo.....	17
Cuadro 6: Importancia de variables en el modelo MAXENT.....	17

## RESUMEN

*Didymosphenia geminata* (Didymo) es una microalga bentónica declarada plaga en el año 2013 por la Subsecretaría de Pesca. Esta tiene una amplia distribución en Chile, encontrándose desde la Región del Biobío hacia el sur del país. Las floraciones de esta especie, ocupan una alta proporción de la superficie de los ríos, alcanzando incluso un 100% de cobertura. Debido a los altos costos ambientales y económicos que provoca la presencia de la especie, es necesario determinar su potencial de expansión en el país y, de esta manera poder enfocar los esfuerzos para su control en las zonas más críticas. Es así como el objetivo de esta memoria fue estudiar la distribución actual y potencial de la microalga *D. geminata* en Chile. De este modo, mediante el uso de distintas variables bioclimáticas, ambientales y geográficas fue posible determinar la distribución potencial de la especie, encontrando que ésta tiene alta probabilidad de expandir su presencia por varias regiones del país. Este procedimiento se llevó a cabo con el algoritmo MAXENT, el cual fue escogido gracias a las buenas predicciones que ha presentado para esta especie con respecto a otros métodos. Por otro lado, se determinó que las variables que más incidencia tienen en la presencia de la especie son la variabilidad estacional, flujo acumulado y la precipitación del periodo más seco del año.

**Palabras Claves:** Didymo, microalga, floraciones, distribución, MAXENT.

## ABSTRACT

*Didymosphenia geminata* (Didymo) is a benthic microalgae, declared as a plague in 2013 by the Subsecretaria de Pesca. This species has a wide distribution in Chile, from Biobío Region towards the south of the country. The bloom of this species, occupy a high proportion of the rivers surface, reaching even a 100% of coverage. Due to the high environmental and economic costs caused by the presence of the species, it is necessary to determine its potential expansion in the country and, in this way, it being able to focus all efforts for controlling it in the most critical areas. Thus, the objective of this report was studying the current and potential distribution of *D. geminata* microalgae in Chile. Therefore, through the use of various bioclimatic, environmental and geographic variables it was possible to define the potential distribution of the species, concluding that it has a high probability of expanding its presence in several regions of the country. This procedure was carried out using the MAXENT algorithm, which was chosen due to the good predictions presented for this species with respect to others methods. On the other hand, it was determined that the variables which are most incidental in the presence of the species are seasonal variability, and the flow and precipitation accumulation in the driest quarter of the year.

**Keywords:** Didymo, microalgae, blooms, distribution MAXENT.

## 1. INTRODUCCIÓN

*Didimosphenia geminata* (Lyngbye) Schmidt es una diatomea bentónica de aguas continentales, característica del hemisferio norte. Fue descrita originalmente en 1819 por Lyngbye, cerca de las islas Feroe y mediante registros fósiles se determinó que su distribución se encontraría cercana a los 30° N (Blanco y Ector, 2009). *D geminata* (Didymo) es un alga unicelular con células de gran tamaño, las cuales varían entre 60 y 140 µm de longitud y entre 25 y 43 µm de ancho (Cox, 1996). Forma un tallo o pedúnculo de material extracelular mucilaginoso rico en polisacáridos, secretado a través de un poro, por el cual se adhiere a sustratos como rocas, plantas, entre otros. De esta forma produce floraciones por reproducción vegetativa denominada vulgarmente "moco de roca" (Kilroy, 2004; Whitton *et al.*, 2009). Las floraciones pueden cubrir grandes extensiones del lecho del río, alcanzando hasta una cobertura de un 100% en los ambientes acuáticos, y de un espesor a veces superior a los 20 cm, produciéndose estas entre final de primavera y comienzo de verano.

Kilroy (2005) definió mediante una amplia revisión bibliográfica, los requerimientos ecológicos para el Didymo en Nueva Zelanda. Dentro de estos se puede mencionar a la temperatura (generalmente se reportan entre 11,5 – 14,6°C durante las floraciones), Radiación (preferencia de sitios con alta exposición a la radiación solar), Geología (rocas duras: volcánicas/ intrusivas no calcáreas) y velocidad de flujo del agua (las zonas de muy baja rotación y muy rápido movimiento). Así mismo existen otros limitantes que pueden afectar a la presencia de la especie. James *et al.* (2013) encontraron una alta relación entre el grado de cobertura del dosel y la presencia de Didymo. Por otro lado, las zonas agrícolas ingresan una cantidad de nutrientes al agua, favoreciendo el proceso de eutrofización de los cuerpos de agua (FAO/CEPE, 1991), lo cual es nocivo para el establecimiento de la especie, debido a que esta se establece en ríos pobres en nitrógeno y fosforo (Kilroy, 2004).

El establecimiento y avance de esta microalga se puede producir por distintas causas, entre estas su resistencia a la desecación le ha permitido un rápido avance a través de Chile (Morales *et al.*, 2012). Se cree que la trasmisión de esta especie se produce cuando parte del sustrato del río infectado es transportado a un nuevo sitio. En este contexto las distintas actividades antrópicas corresponderían a uno de los vectores involucrados en la dispersión del Didymo, ya que este puede adherirse con facilidad a materiales, implementos, vehículos o animales que tomen contacto con el agua en presencia de esta diatomea.

Esta diatomea se ha registrado en numerosos cuerpos de agua a lo largo del mundo, en zonas como: Europa, América del Norte y Nueva Zelanda, entre otras, causando daño a las poblaciones naturales de organismos acuáticos y a las actividades económicas recreativas realizadas en estos ecosistemas (Whitton *et al.*, 2009). Dentro de los países donde se ha propagado la especie tenemos a: Chile, China, Hungría, Islandia, Irlanda, Kazajistán, Kirguistán, Noruega, Pakistán, Polonia, Rumania, Rusia, Suiza, Turquía y Ucrania (Whitton *et al.*, 2009; Satangelo, 2014).

La distribución del *Didymo* abarca varias regiones de la zona centro y sur del país. En Chile la especie fue declarada plaga mediante la resolución exenta 2004/2010 de la Subsecretaría de Pesca (Subpesca). Esta microalga que posee una amplia distribución a nivel mundial fue detectada por primera vez en Chile en el año 1962, sin embargo no hubo otro registro de la misma hasta el año 2010 en la cuenca del río Futaleufú (Región de los Lagos) y más tarde en la Región de Aysén del General Carlos Ibañez del Campo. A partir de esta fecha se ha ido expandiendo rápidamente por el territorio nacional (Díaz *et al.*, 2012). Posteriormente, en el año 2013, se encontró la especie en la Región de Magallanes y la Antártica Chilena (SUBPESCA, 2013).

Dentro de los efectos ambientales que causa la presencia de *D. geminata*, muchos autores han mencionado que genera impactos significativos en las especies nativas y la biodiversidad, esto ya que incide en los procesos ecológicos de los ecosistemas acuáticos (Campbell, 2005; Kilroy y Dale., 2006; Spaulding y Elwell, 2007).

Dependiendo de la cantidad de biomasa producida, esta se degrada depositándose en el río, afectando así a las especies vegetales e invertebrados, llegando potencialmente a involucrar a peces y aves (Kilroy, 2005). Gillis y Chalifour (2009), detectaron cambios en la estructura y abundancia de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos, luego de la detección de “blooms” o florecimientos de *Didymo*. Las floraciones de *Didymo* generan impactos en los canales de transporte de agua, afectando así la generación de energía hidroeléctrica, la agricultura y el consumo humano, los cuales deben ser constantemente limpiados para evitar su colmatación. Las comunidades que sustentan su economía en el turismo, tanto recreativo como asociado a la pesca deportiva, dependen de los recursos naturales que representan uno de sus grandes activos. Estas pueden ser las más vulnerables a los daños causados por la propagación de esta especie y sus floraciones, no sólo por el deterioro estético sino por la merma de la calidad de pesca. Un ejemplo de esto, es Nueva Zelanda, donde en octubre de 2004, se estimaron pérdidas económicas, por múltiples conceptos, que se calcularon en el intervalo de 57 a 300 millones de dólares para un período de ocho años (Branson, 2006).

Así mismo estas floraciones de la especie generan pérdidas de valor estético y recreacional, además de ensuciar botes de pesca artesanal, transformar rocas y lechos de ríos resbaladizos y bloquear las tomas de agua, sin embargo esto no genera un factor de riesgo significativo para la salud humana (Kilroy, 2005)

Los modelos de distribución de especies comenzaron a desarrollarse en la década de los 70 y han ido evolucionando con aportes de diversos autores, tanto en su teoría como en metodologías estadísticas de análisis (Pliscoff y Fuentes-Castillo, 2011). Con la inclusión de los sistemas de información geográfica y las nuevas herramientas de análisis desarrolladas en los últimos años, se comenzaron a desarrollar algoritmos matemáticos que permiten proyectar la distribución espacial de las especies basándose en las presencias y ausencias de estas (Guisan y Zimmermann, 2000; Guisan y Thuiller, 2005; Elith y Leathwick, 2009). En la actualidad se pueden distinguir cuatro grupos de técnicas de modelación de distribución

geográfica (Pliscoff y Fuentes-Castillo, 2011). Estos corresponden a modelos estadísticos de regresiones (Modelos Lineales Generalizados (GLM), Modelos Aditivos Generalizados (GAM)), los métodos de clasificación (Random Forest (RF), Boosted regresión trees (BRT)), los métodos de “sobre” (BIOCLIM, ENFA) y aquellos basados en algoritmos específicos (GARP, MAXENT). El algoritmo de máxima entropía (MAXENT) corresponde a una máquina de aprendizaje que utiliza las presencias o presencias y ausencias de una especie para determinar su distribución, mediante una simple formulación matemática (Phillips *et al.*, 2006), con este método se puede definir el valor de probabilidad de ocurrencia asociado a cada pixel del área de estudio, utilizando una función ajustada a través de variables ambientales numéricas y/o categóricas. El rendimiento predictivo de MaxEnt es consistentemente competitivo con los métodos de mayor rendimiento, teniendo en cuenta que desde su disponibilidad en 2004, se ha utilizado ampliamente para modelar las distribuciones de especies (Elith *et al.*, 2011)

Las variables bioclimáticas son derivadas de las temperaturas mensuales y las precipitaciones, los cuales tienen mayor significancia biológica (BIOCLIM). Este tipo de variables han sido usadas por numerosos autores para determinar la distribución de varias especies (Guisan y Thuiller, 2005; Naoki *et al.*, 2006; Kumar *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2010; Montecinos *et al.*, 2014; McCallum, 2014) mostrando altos niveles de significancia para la predicción de la distribución de distintas especies terrestres y acuáticas.

Es en este contexto donde nace la necesidad de estudiar la distribución potencial de la especie *D. geminata* (Didymo), de manera de poder cuantificar e identificar las zonas que son susceptibles a su avance.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo general

Estudiar la distribución actual y potencial de la microalga *Didymosphenia geminata* (Lyngbye) Schmidt en Chile.

### 2.2. Objetivos específicos

- Analizar la distribución actual de *Didymosphenia geminata* en Chile caracterizando las variables bioclimáticas, geográficas y ambientales, que resulten más relevantes.
- Determinar la distribución espacial potencial de *Didymosphenia geminata* y focalizar la gestión de control de la especie en las zonas de mayor riesgo.

### 3. MATERIAL Y MÉTODO

#### 3.1. Material

Para desarrollar el modelo de la distribución de la especie *Didymosphenia geminata*, se trabajó con la base de datos de la Subsecretaría de Pesca (SUBPESCA) y el Servicio Nacional de Pesca (SERNAPESCA). Esta base se compone de monitoreos realizados desde el año 2010 al 2015. Se tomaron para este estudio sólo los registros de presencia de la especie y no las ausencias, ya que esto puede subestimar el posible hábitat de la especie.

Para la modelación se usaron variables categóricas y numéricas (Cuadro 1), las que según la bibliografía revisada tienen relevancia en los patrones de distribución de la especie.

**Cuadro 1: Variables usadas en la modelación.**

Tipo de Variable	Variables	Fuente
Numéricas	Bioclimáticas	WorldClim, 2005
	Pendiente, Flujo acumulado	WorldClim, 2005
	Radiación Solar	NTSG, 2011
	Evapotranspiración	NTSG, 2011
Categóricas	Uso de Suelo	CONAF, 2011
	Composición geológico	SERNAGEOMIN, 2003

Las variables bioclimáticas que se utilizaron en este estudio (Cuadro 2), corresponden a las disponibles en el sitio de World Clim (2005). Estas son derivadas de los registros mensuales de temperatura y precipitación que se registraron durante un periodo de 30 años. Estas variables definen tendencias generales, variaciones estacionales y extremos, siendo de esta manera más significativas desde el punto de vista de la tolerancia biológica que tener simples promedios mensuales. Este tipo de variables son comúnmente usadas para la modelación de diversos grupos biológicos y su uso y efectos sobre los resultados finales poseen varias revisiones y evaluaciones (Elith *et al.*, 2002; Van Niel *et al.*, 2004; Dormann *et al.*, 2008;).

Desde esta misma fuente (World Clim) se obtuvo el modelo digital de elevaciones, con el cual se derivaron posteriormente las variables Pendiente y Flujo acumulado. Estas variables fueron incluidas en el estudio debido a su poder como predictoras en estudios previos de distribución de especies acuáticas (Kumar *et al.* 2009; Poulos *et al.* 2012; Montecinos *et al.*

2014). Todas estas variables tienen una resolución espacial aproximada de 1km, lo cual para este tipo de trabajos corresponde a una buena resolución.

Las variables derivadas de la temperatura del aire fueron usadas para reemplazar a la temperatura del agua tomando en cuenta que la bibliografía ha indicado que existe una alta correlación entre estas (Kothandaraman y Evans 1972). Así mismo, otras variables relativas a la calidad fisicoquímica del agua como lo son el pH, el oxígeno disuelto, la concentración de nutrientes y otras más, resultarían ideales para modelar la distribución de especies acuáticas, estas no tienen coberturas espaciales a nivel nacional que permitan desarrollar un modelo de este tipo.

**Cuadro 2: Variables bioclimáticas de WorldClim.**

<b>Código</b>	<b>Variables</b>
BIO1	Media anual de temperatura del aire
BIO2	Intervalo de la temperatura media diurna (Media del mes (max temp - min temp))
BIO3	Isoterma (BIO2/BIO7) (* 100)
BIO4	Estacionalidad de la temperatura del aire (desviación estándar *100)
BIO5	Máxima temperatura del aire del mes más cálido
BIO6	Mínima temperatura del aire del mes más frío
BIO7	Rango anual de temperatura del aire (BIO5-BIO6)
BIO8	Temperatura media del aire del cuarto más húmedo
BIO9	Temperatura media del aire del cuarto más seco
BIO10	Temperatura media del aire del cuarto más cálido
BIO11	Temperatura media del aire del cuarto más frío
BIO12	Precipitación anual
BIO13	Precipitación del mes más húmedo
BIO14	Precipitación del mes más seco
BIO15	Estacionalidad de la precipitación (Coeficiente de variación)
BIO16	Precipitación del cuarto más húmedo
BIO17	Precipitación del cuarto más seco
BIO18	Precipitación del cuarto más cálido
BIO19	Precipitación del cuarto más frío

Se incluyeron la información de uso de suelo (CONAF, 2011) y la composición geológica de origen (SERNAGEOMIN, 2013) como variables cualitativas para la modelación. Para la radiación solar y la evapotranspiración se obtuvieron la cobertura disponible en la página de la NTSG (2015), las cuales fueron construidas a partir de información recolectada por el

sensor MODIS entre los años 2000 a 2006 y poseen una resolución espacial aproximada de 1 km.

### 3.2. Método

#### 3.2.1. Procesamiento inicial de la información

Para trabajar las coberturas espaciales se utilizó el programa Qgis 2.12 Lyon. En este se procesó la base de datos de las presencias de Didymo, construyéndose una capa que mantuvo almacenada la ubicación geográfica utilizando el sistema de información de referencia WGS 84. Además en este mismo programa se procedió a recortar las coberturas descargadas de WorldClim, reduciéndolas al tamaño de Chile. A partir del modelo digital de elevaciones obtenido de la misma fuente, se generó la capa de acumulación de flujo (“Flow accumulation”), la cual entregó una salida en donde cada pixel representa el valor relativo a la cantidad de celdas que aportarían agua a ese punto.

Las variables cuantitativas usadas en este estudio, debieron ser tipificadas de manera numérica para ser ingresadas al modelo ya que este es un requerimiento del programa. Las categorías utilizadas para la variable uso de suelo corresponden a una agrupación de los tipos presente en el catastro de recursos vegetaciones de la CONAF, mientras que para para la composición geológica se utilizaron los valores del campo composición del Mapa geológico de Chile. En los Cuadro 3 y 4 se aprecian las codificaciones de las variables.

**Cuadro 3 : Clasificación variable Uso de suelo.**

Uso de Suelo	Código
Bosque con árboles de ambas formas de hojas	1
Bosque de hoja ancha, caduco, abierto	2
Bosque de hoja ancha, caduco, cerrado	3
Bosque de hoja ancha, siempreverde	4
Cobertura con herbáceas o arbustos regularmente anegada	5
Cobertura de arbustos, cerrado-abierto, caduco	6
Cobertura de arbustos, cerrado-abierto, siempreverde	7
Cobertura de herbáceas, cerrado-abierto	8
Escasa cobertura con herbáceas o arbustos	9
Hielo, nieve	10
Mosaico: Cultivos / arbustos y/o praderas	11
Mosaico: Cultivos/ Bosques / otra vegetación natural	12
sin vegetación	13

Uso de Suelo	Código
Zonas cultivadas	14
Zonas urbanizadas	15
Otras	16

**Cuadro 4 : Clasificación variable Composición geológica.**

Composición geológica	Código
Rocas intrusivas	1
Rocas metamórficas	2
Sin Información	3
Secuencias sedimentarias	4
Secuencias volcánicas	5
Secuencias volcano/sedimenta	6

### 3.2.2. Selección de variables

Generalmente las variables ambientales tienen una alta correlación entre ellas, por ende para explorar su covarianza y reducir el número de variables se usó el análisis de componente principales (PCA) (Hirzel *et al.*, 2002) y adicionalmente se seleccionaron las variables biológicamente más significativas desechando las más correlacionadas (valores mayores a 0,5) (Jimenez-Valverde *et al.*, 2009). Esto con el programa estadístico R Project versión 3.2.2.

### 3.2.3. Modelamiento

Para modelar la distribución potencial de *Didymo*, se utilizó el algoritmo de máxima entropía (MAXENT), el cual se encuentra incorporado en el programa MAXENT v 3.3.3k. Este tipo de algoritmo posee una teoría ampliamente bien entendida y se utiliza en aquellos casos en que solo se modela la distribución con la presencia de la especie (Elith *et al.*, 2011) y además ha registrado resultados positivos para modelar la distribución de *Didymo* (Kumar *et al.*, 2008; Montecinos *et al.*, 2014; McCallum, 2014). No obstante existen otros algoritmos que pueden ser utilizados para este tipo de casos, pero el que ha mostrado mejores resultados ha sido MAXENT. Este programa, corresponde a una máquina virtual que tomando datos aleatorios del entorno y con una serie de datos de entrenamiento, ajusta un modelo para predecir la probabilidad de presencia de una especie en una unidad de territorio (pixel).

Para este análisis, se separaron aleatoriamente los datos de presencias en tres grupos, generando tres repeticiones las cuales fueron ponderadas, determinando de esta manera la

distribución potencial de *D. geminata*. Por otro lado, se validaron cada una de las tres repeticiones del modelo, dejando afuera un 25% de las muestras, para realizar una validación cruzada de los resultados.

Se determinó la eficacia del modelo ponderado, mediante el criterio de área bajo la curva (AUC) de las curvas del Receptor de operación (ROC). La curva ROC evalúa la eficacia del modelo en término de los errores de omisión y comisión, comparando los resultados del modelo con uno que clasifica de manera aleatoria. Por otro lado el AUC indica de manera numérica la eficacia del modelo en donde los valores cercanos a uno son los mejores (Fawcett, 2006).

Una vez realizado el modelo se clasificaron las zonas del territorio dependiendo de su probabilidad de presencia de la especie como bajas, medias y altas. Se determinó para cada región la cantidad de territorio que posee una mayor susceptibilidad a tener *D. geminata*.

#### **3.2.4. Análisis de importancia de las variables.**

Se determinó el aporte porcentual de cada una de las variables usadas en el modelo de MAXENT, tomando en cuenta la ganancia de AUC que estas provocaron. Por otra parte para definir la importancia de cada variable en cuanto a la ganancia o pérdida de AUC, se aplicó el método “Jack knife”, el cual desarrollo los posibles modelos excluyendo cada una de las variables, además de generarlos de manera independientes para cada una de ellas. Para las variables más significativas se graficó su relación con la probabilidad de presencia en los modelos generales e independientes, siendo los primeros aquellos en donde se usaron todas las variables y en los segundos solo la variable a analizar.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Información Inicial

Desde la base de datos inicial se extrajeron 97 datos de presencia de *D. geminata*, los cuales se distribuyen entre las VII y XII regiones. Estos datos se aprecian en la Figura 1. La bibliografía indica que para el modelamiento de distribuciones de especie es necesario contar con un mínimo aproximado de 40 registros de la especie (Wiszniewski *et al.*, 2008) por lo que los datos son suficientes para emplear el modelo.

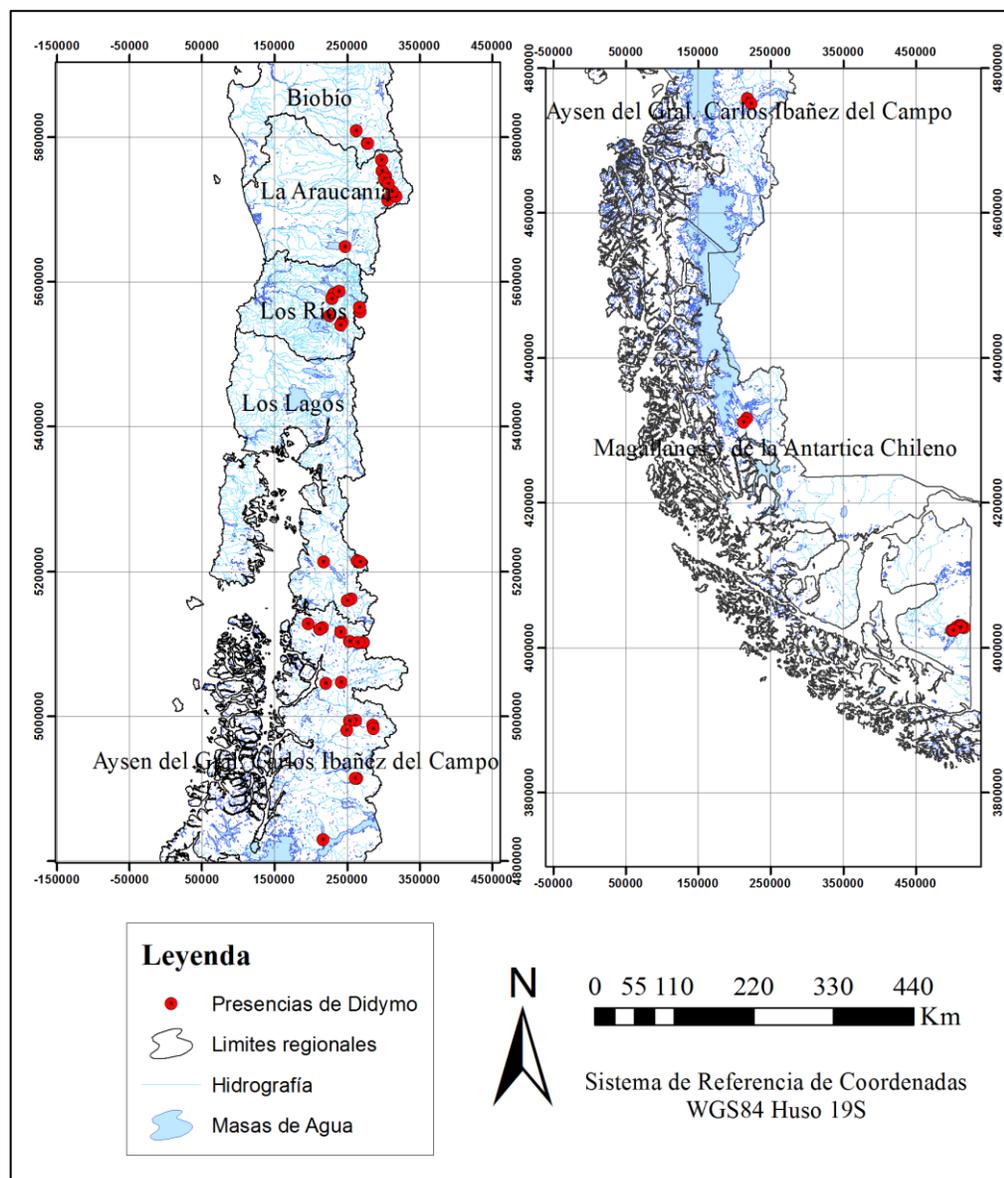
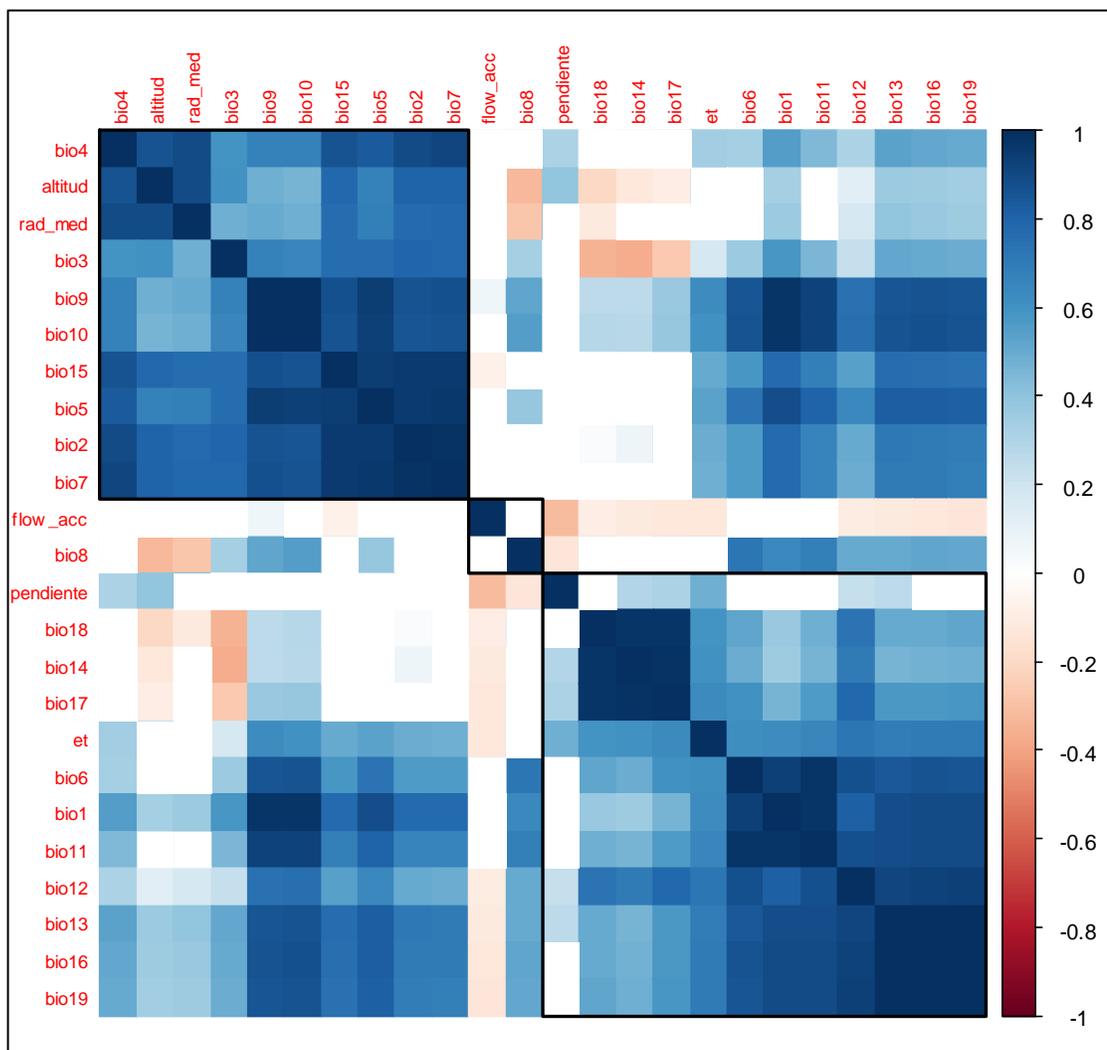


Figura 1: Presencias de *Didymosphenia geminata* en Chile.

## 4.2. Selección de las variables

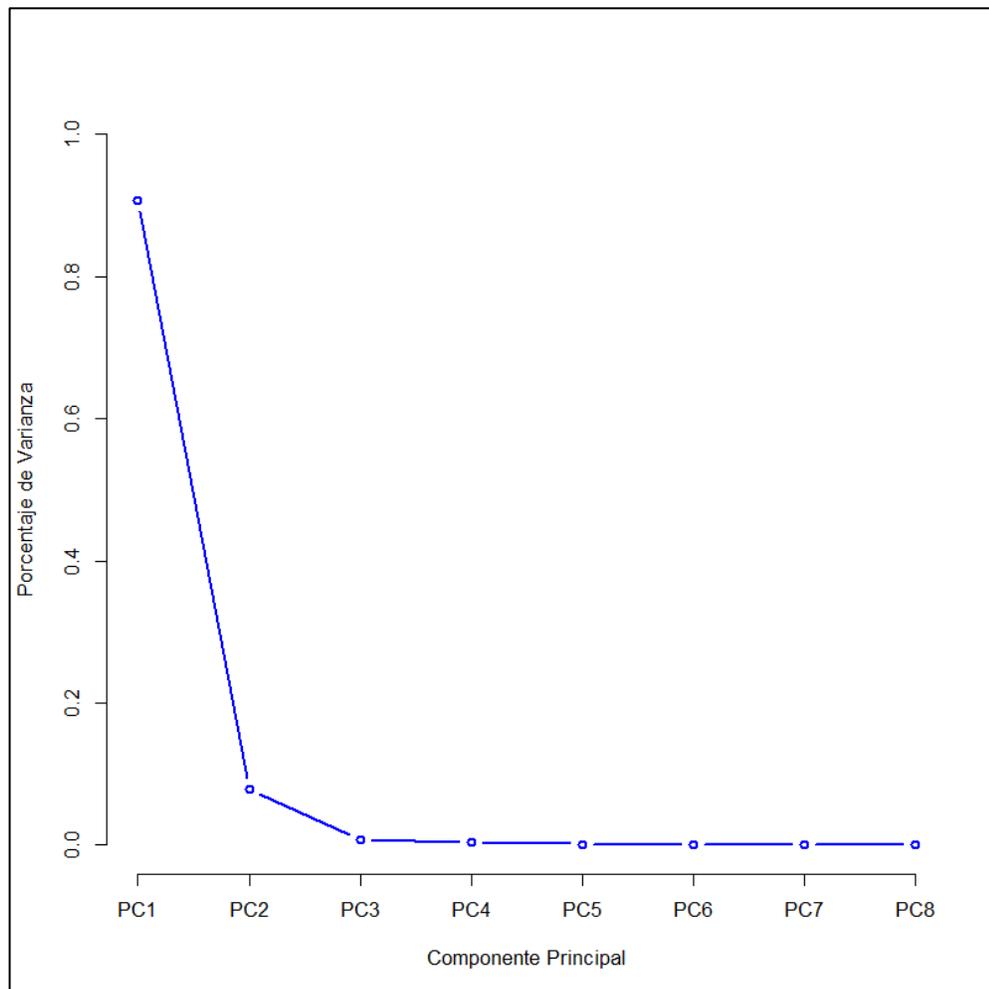
En Figura 2 se muestra la matriz de correlaciones múltiples, en la cual las tonalidades azules indican correlación positiva y las rojas negativas. Este análisis indicó que las variables acumulación de flujo (flow\_acc), pendiente, Temperatura media del aire del cuarto más húmedo (BIO8), Precipitación del mes más seco (BIO14), Precipitación del cuarto más cálido (BIO18) y radiación media (Rad\_med) son las que presentan más baja dependencia del resto de las variables (Entre -0,5 y 0,5) y con una alta significancia ( $p > 0,05$ ).



**Figura 2: Análisis de correlación múltiple para variables ambientales. Eje vertical corresponde al índice de correlación de Spearman.**

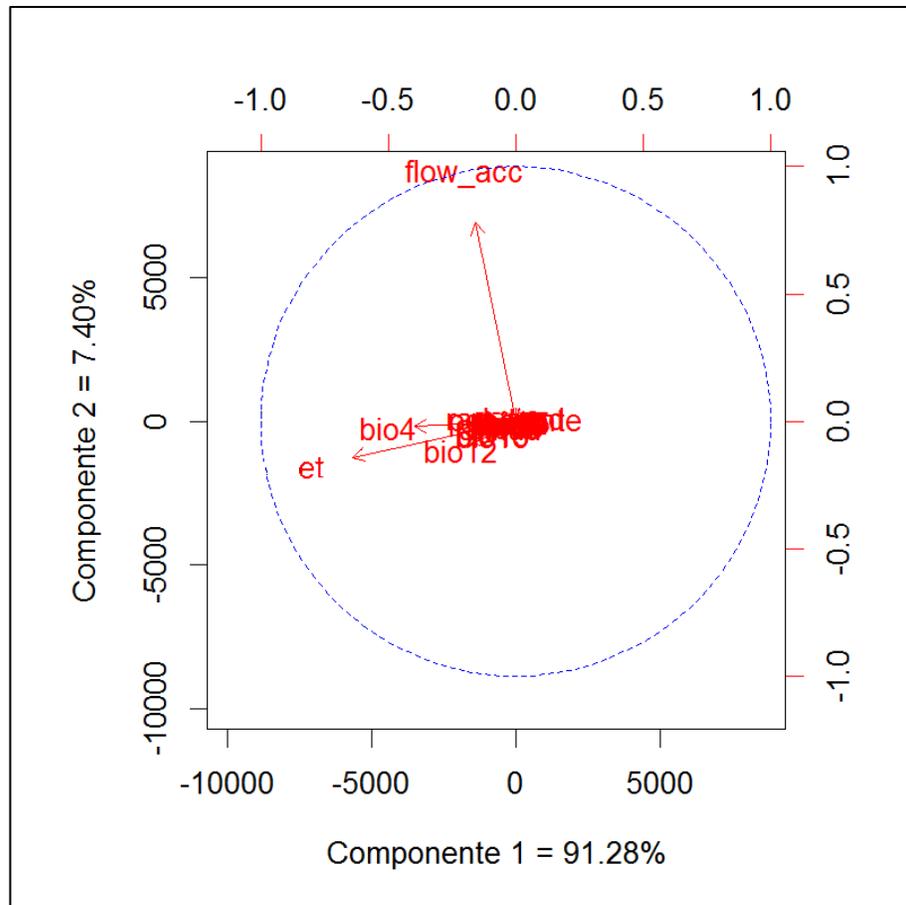
El gráfico de sedimentación (Figura 3) muestra el aporte porcentual de explicación de la varianza para cada uno de ejes generados en el análisis de componentes principales. En este

análisis los dos primeros ejes explicaron un 98,68% de la varianza de los datos usados (91,28 y 7,40 %, respectivamente), por lo cual este análisis es válido para ser utilizado.



**Figura 3: Gráfico de sedimentación para varianza explicada por cada uno de los componentes principales.**

En la Figura 4 se presentan aquellas variables que tienen mayor correlación con los componentes principales, es decir aquellas que explican una mayor proporción de la varianza de los datos. Estas variables corresponden a las que tienen vectores de mayor longitud y corresponden a acumulación de flujo (flow\_acc), evapotranspiración, Precipitación anual (BIO12) y Estacionalidad de la Temperatura del Aire (BIO4).



**Figura 4: Análisis de componentes principales para variables ambientales.**

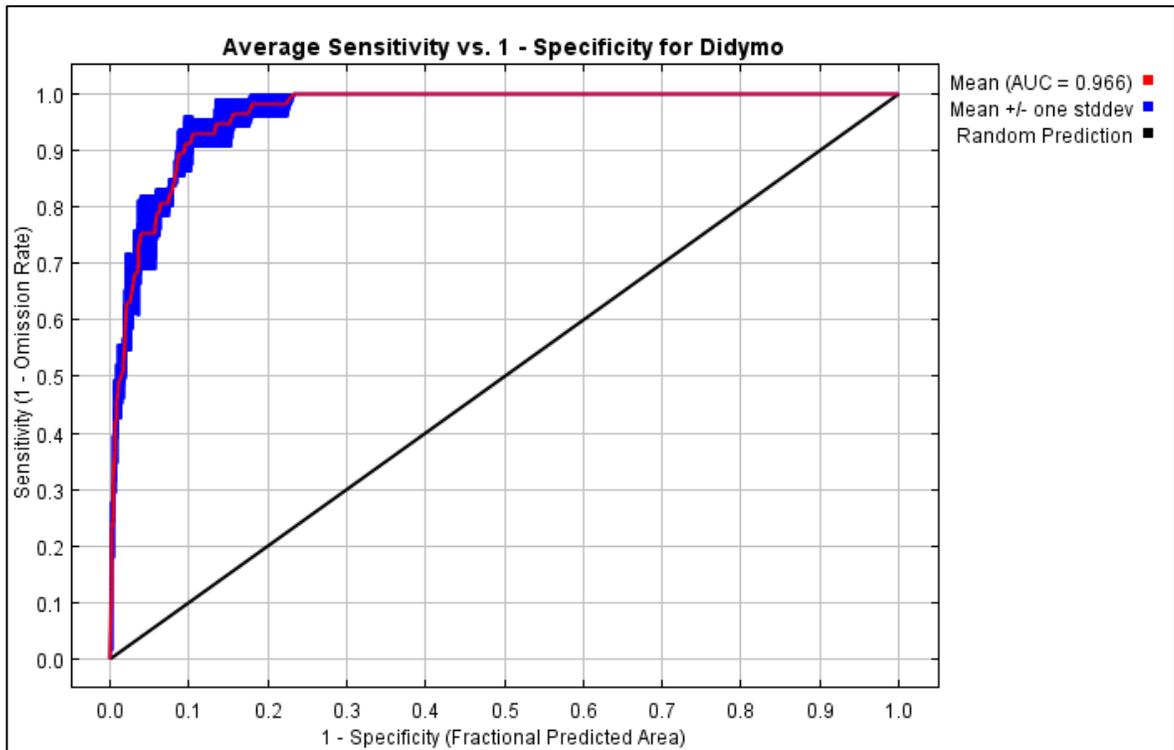
Teniendo en cuenta estos resultados, las variables que se seleccionaron para la realizar el modelo de *D. geminata* fueron: acumulación de flujo, pendiente, evapotranspiración, uso de suelo, geología, radiación media, Estacionalidad de la Temperatura del Aire (BIO4), Temperatura Media del Aire del cuarto más Húmedo (BIO8), Precipitación Anual (BIO12), Precipitación del mes más Seco (BIO14) y Precipitación del cuarto más cálido (BIO18).

### 4.3. Modelamiento de la distribución

#### 4.3.1. Resultados generales del modelo

Se generaron tres réplicas de corridas de MAXENT, con estas se definieron los valores promedios y desviaciones respectivas de los estadísticos analizados. Los modelos generados tuvieron una baja tasa promedio de omisión de presencias, es decir los pixeles asociados a los puntos de presencias estos tienen una alta probabilidad de presencia de especie. Esto se puede ver reflejado en las curvas ROC de los modelos (Figura 5), en donde la línea roja representa el valor promedio obtenido por las tres réplicas usadas y la banda azul la

desviación estándar. Los modelos tuvieron un área bajo la curva (AUC) promedio de 0,966 con una desviación estándar de 0,08. Por otro lado, la línea de color negro representa a un modelo que clasifica de manera aleatoria (AUC de 0,5), por ende entre más alejada este la curva de color rojo, mejor será tasa de omisión de presencias. Tomando en cuenta lo anterior, el modelo predice de buena manera las presencias de la especie. Este resultado es comparable con los modelos desarrollados para la misma especie por Montecinos *et al.* (2014) y Kumar *et al.* (2008) los cuales obtuvieron valores de AUC de 0,85 y 0,92.



**Figura 5: Curvas operador receptor (ROC) de Modelo MAXENT para modelo ponderado de *D. geminata*.**

La validación cruzada realizada para cada una de las tres réplicas usadas en el modelo, fue significativa en todas sus pruebas ( $p < 0,005$ ). Esto indicó que la eficacia que cada uno de las estimaciones de las réplicas es mejor que una estimación realizada por un modelo aleatorio.

La Figura 6 corresponde a la representación gráfica del modelo, en una escala logística que muestra la probabilidad de presencia de la especie para el territorio nacional. En el mapa se puede apreciar que la distribución potencial de las especie abarca desde la región del Maule hacia el Sur. La probabilidad de presencia se estimó como baja (15-30%), media (30-50%) y alta (<50%). Se puede considerar que la distribución potencial involucra un territorio mayor a la conocida, observando que en varias regiones existen zonas con una alta probabilidad de encontrar a la especie.

El Cuadro 5 muestra las diferentes áreas con mayor probabilidad de ser invadidas en cada una de las regiones. Se aprecia que la región que tiene una mayor superficie con susceptible de ser invadida por esta especie es la de Aysén del Gral. Carlos Ibáñez del Campo con un total de 108.494,4 km<sup>2</sup>. Por otra parte, la región que tiene una mayor probabilidad de tener a la especie con respecto a su propia superficie, es la del Biobío con un 5,6% de su área. Así mismo la que tiene menor superficie de ser invadida es la Región de Los Ríos, con un total de 289,9 km<sup>2</sup>, mientras que en relación porcentual será la Región de Magallanes y de la Antártica Chilena, según el modelo desarrollado.

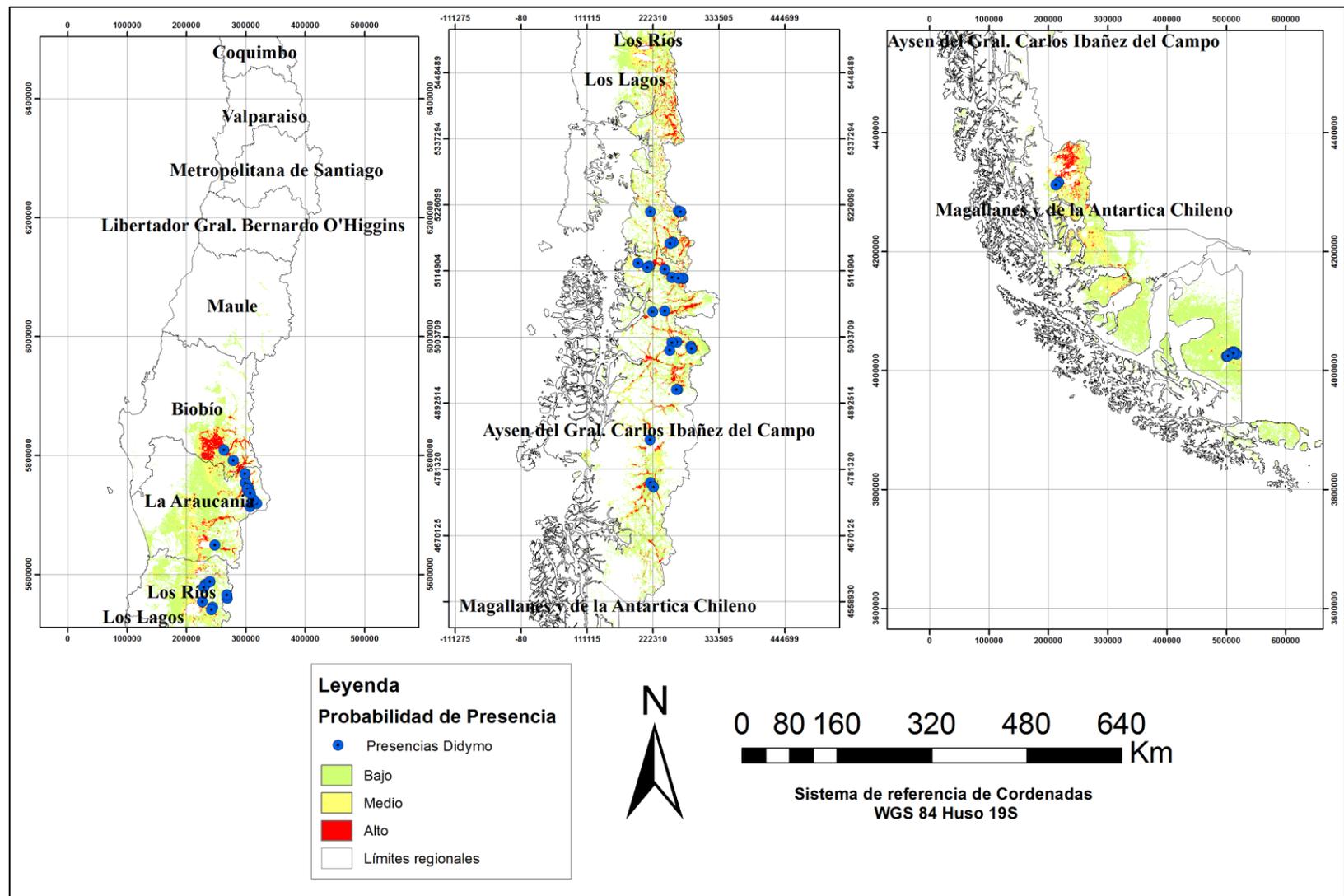


Figura 6: Distribución potencial de *Didymosphenia geminata* en Chile.

**Cuadro 5: Áreas por región con mayor probabilidad de presencia de Didymo.**

Región	Área Región (km <sup>2</sup> )	Área alta probabilidad (km <sup>2</sup> )	Alta prioridad (%)
Aysen del Gral. Carlos Ibáñez del Campo	108.494,4	2.828,9	2,6
Biobío	37.068,7	2.089,6	5,6
La Araucanía	31.842,3	642,7	2,0
Los Lagos	48.583,6	1.734,2	3,6
Los Ríos	18.429,5	289,9	1,6
Magallanes y de la Antártica Chilena	132.297,2	1.203,3	0,9

#### 4.3.2. Análisis de importancia de las variables

Por otro lado se analizó la contribución de cada una de las variables al modelo general, lo cual se ve en la siguiente tabla:

**Cuadro 6: Importancia de variables en el modelo MAXENT.**

Variable	Contribución al modelo (%)
Flujo acumulado	22,8
Precipitación del mes más seco (BIO14)	21,6
Material geológico	16,2
Estacionalidad de la Temperatura del aire (BIO4)	12,8
Evapotranspiración	11,8
Uso de Suelo	6,9
Precipitación del cuarto más cálido (BIO18)	6,0
Pendiente	0,9
Precipitación Anual (BIO12)	0,5
Temperatura media del aire del cuarto más húmedo (BIO8)	0,3
Radiación Solar	0,2

Podemos apreciar que las variables Flujo acumulado, Precipitación del mes más seco (BIO14), Geología y Estacionalidad de la temperatura (BIO4) son las que más aportan al modelo. Esto coincide con los estudios previos en donde se ha encontrado que parte de las variables del Cuadro 6 influyen en la distribución de la especie (Kilroy, 2004; Kumar *et al.*; Montecinos, 2014 y Kawecka y Sanecki ,2003)

### 4.2.3 Prueba “Jack knife”

La Figura 7 muestra los resultados de la prueba “Jack knife” para la importancia de las variables en cuanto a su aporte al modelo, en la cual la barra de color azul corresponde a la ganancia de un modelo generado únicamente con una variable mientras que la diferencia entre la barra de color rojo y la barra de color calipso representa la pérdida al restar esta variable.

De esta manera se puede apreciar que la variable ambiental con ganancia más alta cuando se utiliza por sí sola, es la precipitación del mes más seco (BIO14), que por lo tanto parece tener la información más útil por sí misma. Esta variable está ligada a la cantidad de agua que existe en los cuerpos de agua durante la época estival, por lo tanto también en los caudales, los cuales se sabe que influyen en la presencia de *Didymo* (Kilroy, 2004). Por otra parte, la variable ambiental que disminuye más la ganancia del modelo cuando se omite es acumulación de flujo (flow\_acc), que por lo tanto corresponde a la que entrega mayor información que no está presente en las otras variables. Esto puede deberse a que la variable acumulación de flujo es la que distingue las zonas con presencia de sistemas límnicos, por ende esta variable discrimina las zonas con y sin presencia de ríos, por lo que si bien entrega información para el modelo, no es un factor que discrimine de manera eficiente las zonas con presencia de la especie, así mismo también es un indicador del volumen de agua transportado el cual es una limitante a la cantidad de luz que llega al bentos y por ende de la actividad fotosintética (Cullis *et al.*, 2012). Así mismo también se puede destacar a la variable Estacionalidad de la temperatura (BIO 4) la cual restaría mucho al modelo.

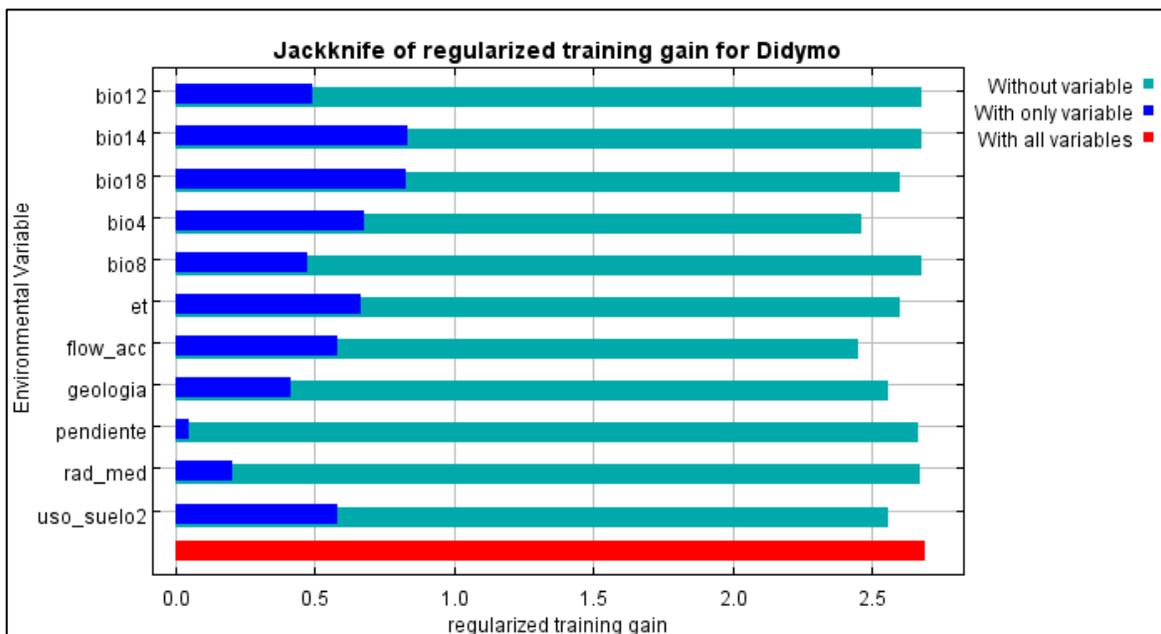
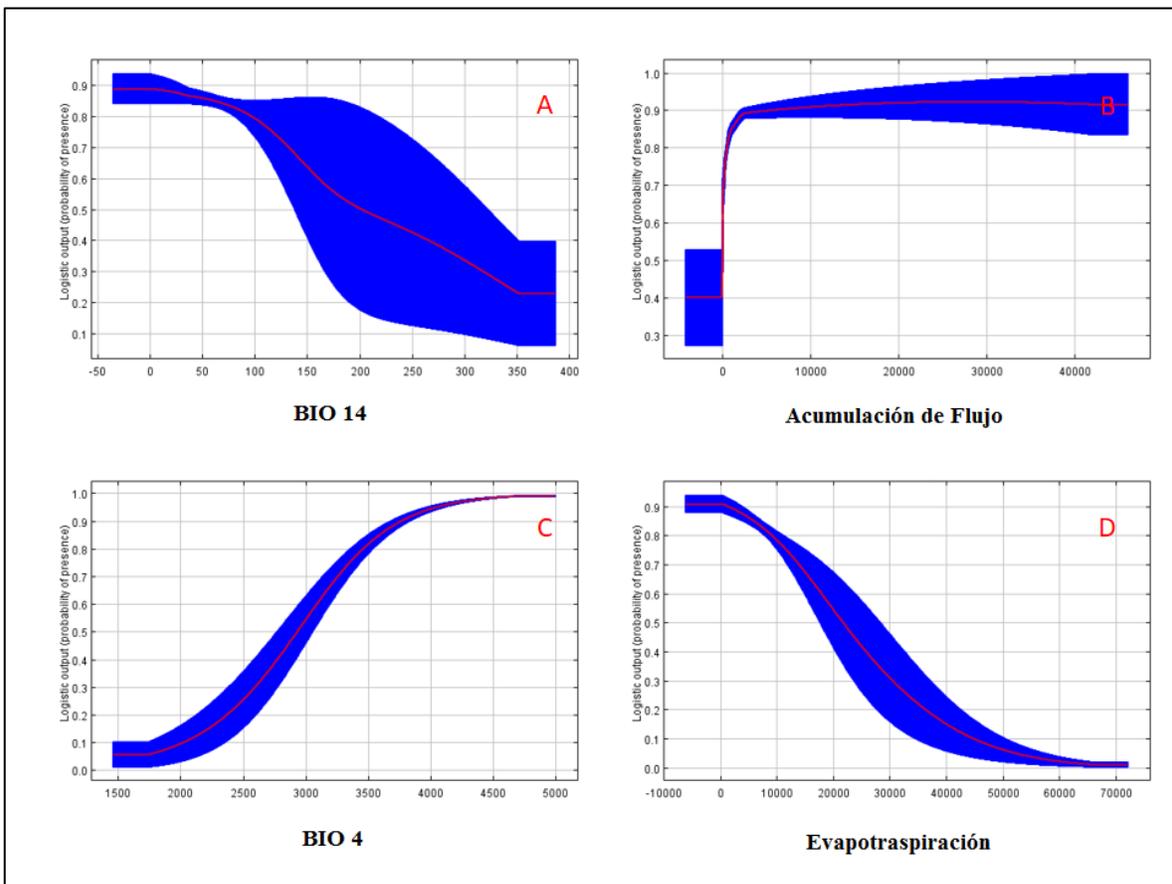


Figura 7: Análisis “Jack knife” para variables ambientales del modelo MAXENT.

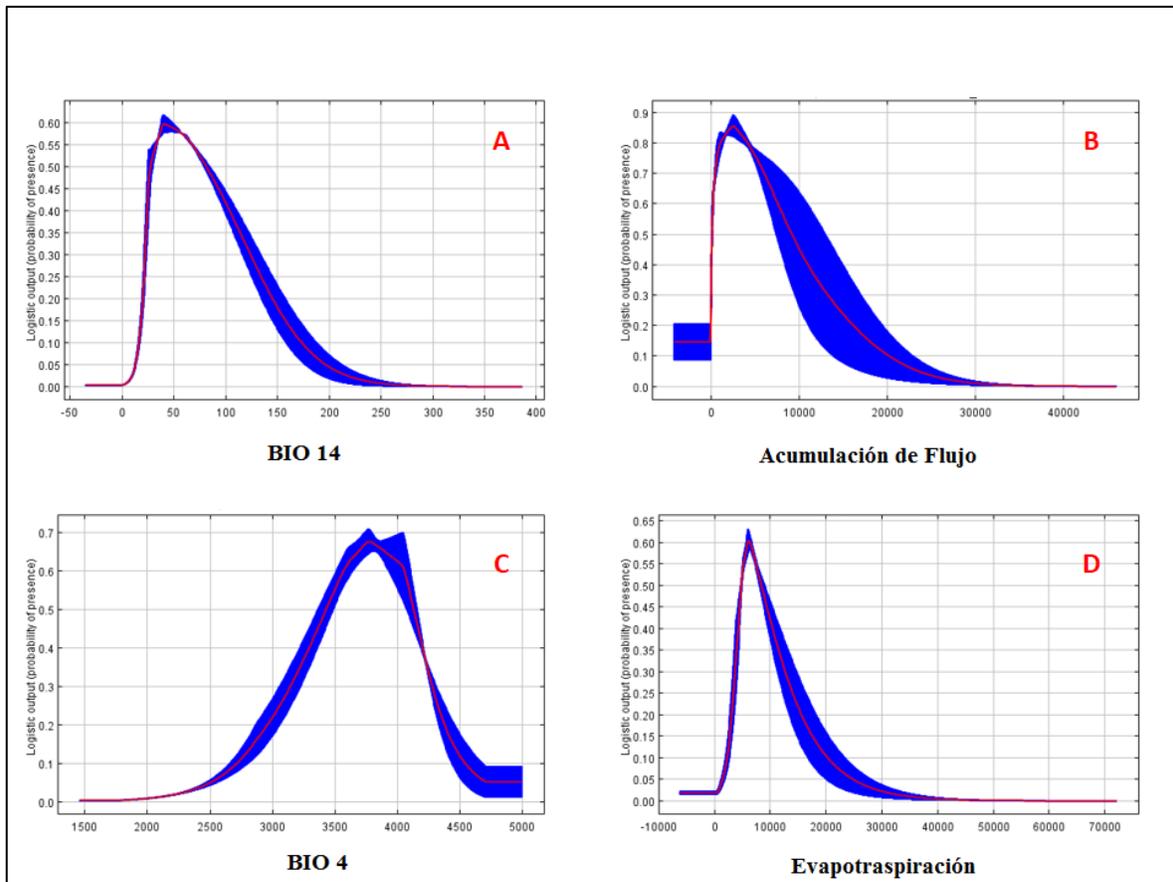
#### 4.4. Relación de las variables y la probabilidad de presencia

La Figura 8 muestra la relación entre las variables ambientales más significativas del modelo y la predicción de MAXENT. Las curvas grafican la variación de la probabilidad de presencia a medida que cada variable ambiental es modificada, manteniendo todas las otras variables ambientales a su valor promedio de la muestra. La línea roja muestra la respuesta media de las 3 réplicas de MAXENT, mientras que la franja azul corresponde a la desviación estándar. Se aprecia que las variables precipitación del mes más seco (BIO14) y evapotranspiración tienen una relación inversamente proporcional con la probabilidad de presencia de la especie. Por otro lado la acumulación de flujo (flow\_acc) mantiene un valor constante y no genera variabilidad en la probabilidad de presencia. Para la variable estacionalidad de la temperatura (BIO4), se observó que a mayor variabilidad de las temperaturas entre las estaciones se tiene una mayor probabilidad de presencia.



**Figura 8: Curvas de respuesta de variables ambientales de modelos compuestos. . A) Precipitación del mes más seco. B) Acumulación de Flujo. C) Estacionalidad de la temperatura. D) Evapotranspiración.**

En contraste a lo anterior, la Figura 9 muestra las curvas desarrolladas usando solo una de las variables. En esta gráfica se puede apreciar que la probabilidad de presencia de *Didymo* tiene un comportamiento similar tanto para precipitación del mes más seco (BIO14) y acumulación de flujo (flow\_acc), las cuales van aumentando sus valores y luego disminuyen paulatinamente a medida que aumenta la variable. En cambio para la estacionalidad de la temperatura (BIO4), la probabilidad de ocurrencia va aumentando hasta alcanzar un peak y luego de eso va disminuyendo gradualmente.

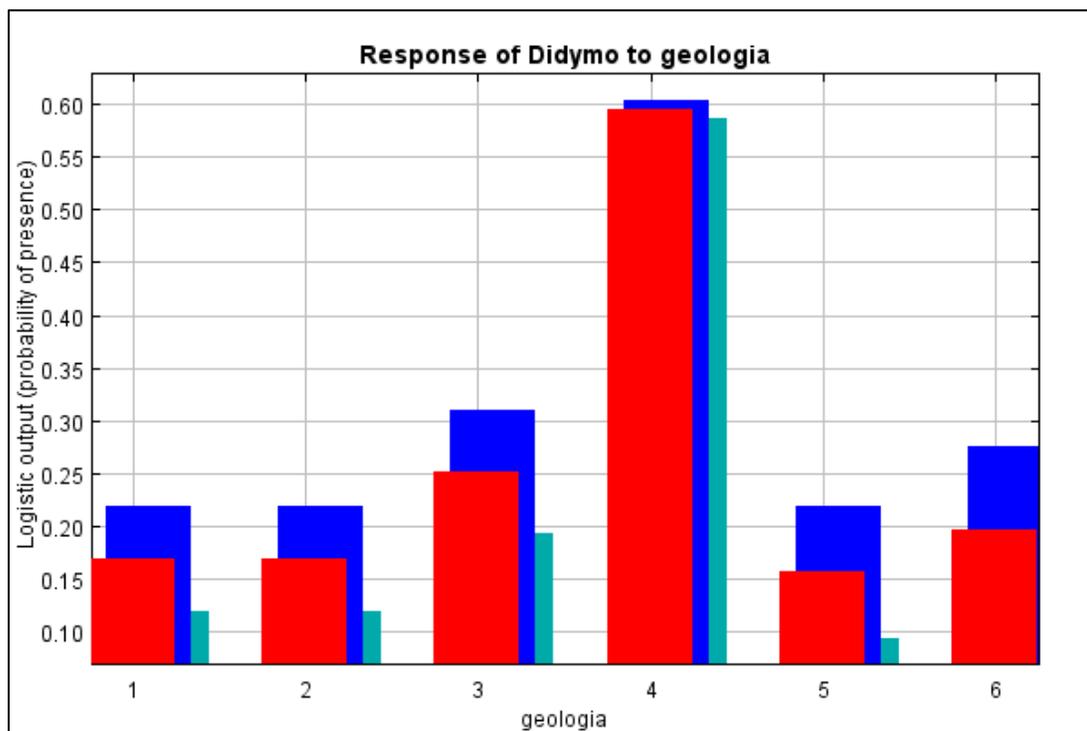


**Figura 9: Curvas de respuesta de variables ambientales de modelos individuales. A) Precipitación del mes más seco. B) Acumulación de Flujo. C) Estacionalidad de la temperatura. D) Evapotranspiración.**

El comportamiento de la variable acumulación de flujo concuerda con la bibliografía (Kaweka y Saneki, 2003, Kilroy, 2004), la cual indica que a mayor caudal disminuye la radiación fotosintéticamente activa que penetra hasta el fondo del río lo que limita el desarrollo de cualquier organismo fotosintetizador. Es por este mismo motivo que la precipitación del mes más seco pasa a tener una fuerte influencia en el modelo. Por otra parte, la mayor diferencia entre las temperaturas de las distintas estaciones influye en que durante algún período del año se generen las temperaturas más favorable para el desarrollo de la

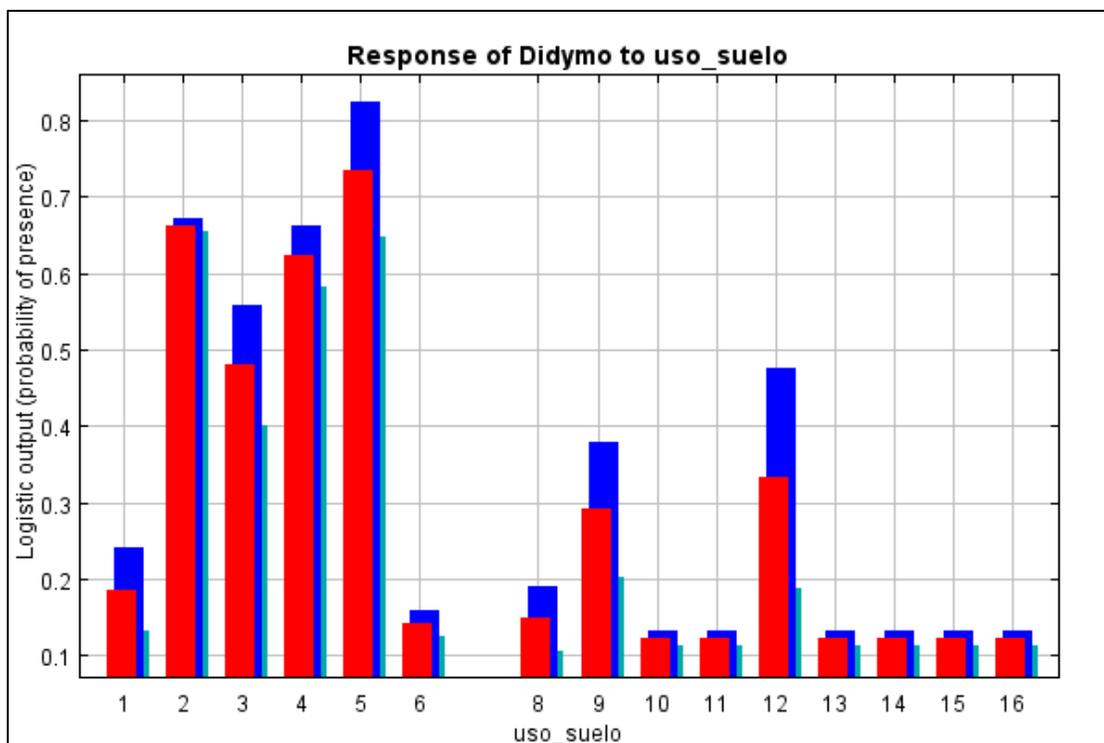
especie (Kilroy, 2004). Así mismo, dentro de los estudios previos realizados en Chile para *D. geminata* (Lillo, *et Al.*, 2016), en donde se han monitoreado diversos parámetros fisicoquímicos y características del habitat, ha sido posible determinar que dentro de la variable que más influyen en la colonización de la especie se encuentra el régimen hidrológico, en donde aquellos del tipo nivo-pluvial tienden a presentar la plaga mientras que los pluvio-nival no. Por otra parte también se han encontrado diferencias significativas en la velocidad de fondo de los ríos, en donde los ríos donde se encuentra la especie presentarían valores más bajos. Todo esto apunta a la alta relevancia que tienen las variables hidrológicas como factor limitante para la presencia de la especie.

Las Figura 10 y Figura 11, representan la relación entre las variables categóricas con la probabilidad de presencia de la especie. En estos histogramas la barra roja representa el valor ponderado para las tres réplicas del modelo mientras que las azules y calipso corresponden a la desviación estándar. Para el caso de composición geológica (Figura 10) la mayor probabilidad de presencia de la especie se encuentra en sitios con rocas sedimentarios (4), lo cual contradice a la preferencia reportada por Kilroy (2004) para la especie en Nueva Zelanda y Montecinos *et al.* (2014) para el Sur de Chile. Este tipo roca podrían caracterizarse por tener altos niveles de calcio y las prospecciones para esta especie en Chile han determinado que esta se encuentra presente en sitios con niveles elevados de este elemento (Lillo, *et Al.*, 2016).



**Figura 10: Respuesta de variable composición geológica.**

Para la variable categórica uso de suelo (Figura 11), se aprecia que la mayor probabilidad de presencia de la especie está en bosques de hoja ancha (2, 3 y 4) y coberturas con herbáceas o arbustos regularmente anegada (5).



**Figura 11: Respuesta de variable uso de suelo.**

La menor probabilidad de encontrar a la especie en suelos de tipo agrícola (11, 12 y 15) puede atribuirse a que este tipo de uso aporta una mayor concentración de nutrientes (Nitrógeno y Fósforo) al agua. Este fenómeno favorecería la eutrofización de los ríos generando condiciones desfavorables para el establecimiento del Didymo. Específicamente en el caso del Fósforo se ha observado que las altas concentración de este nutriente detiene frecuencia de división celular de la especie (Bothwell *et al.*, 2014).

## 5. CONCLUSIONES

- Se pudo determinar la distribución potencial de la especie *D. geminata* validado con valor de AUC para la curva ROC de 0,966, lo cual comparado con estudios similares corresponde a un buen modelo.
- Así mismo las variables que fueron más significativas para el modelo fueron la Acumulación de flujo (22,8%), la precipitación del mes más seco (21,6%), Material geológico (16,2), Estacionalidad de las temperaturas (12,8%) y Evapotranspiración (11,8%).
- Por otra parte en términos de aporte al AUC del modelo las variables más importantes fueron la precipitación del mes más seco y la acumulación de flujo, también se puede destacar en ese sentido a la estacionalidad de la temperatura del aire.
- La probabilidad de encontrar Didymo en Chile es más alta en aquellos sitios que poseen bajos valores de acumulación de flujo (asociado a bajos caudales), alta variación estacional, poca precipitación en verano y con zonas con uso de suelo que no correspondan a actividades agrícolas.
- La distribución potencial de la especie abarca varias regiones del país, siendo las VIII, X y XII aquellas que poseen una mayor cantidad de territorio susceptible a la aparición de la plaga.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

**BLANCO, S. Y ECTOR L. 2009**, Distribution, ecology and nuisance effects of the freshwater invasive diatom *Didymosphenia geminata* (Lyngbye) M, Schmidt: A literature review. *Nova Hedwigia* 88:347–422.

**BOOTH, T; NIX, H; BUSBY, J. Y HUTCHINSON, M. 2014**. BIOCLIM: the first species distribution modelling package, its early applications and relevance to most current MAXENT studies. *Diversity and Distributions*, (Diversity Distrib.)20, 1–9.

**BOTHWELL, M; TAYLOR, B. Y KILROY, C. (2014)**. The Didymo story: the role of low dissolved phosphorus in the formation of *Didymosphenia geminata* blooms, Diatom Research,

**BRANSON, J. 2006**. *Didymosphenia geminata* economic impact assessment: Wellington, New Zealand. New Zealand Institute of Economic Research Report: 1-22.

**CAMPBELL, M. 2005**. Organism Impact Assessment (OIA) for potential impacts of *Didymosphenia geminata*. All Ocean Ecology. Blairgowrie, Australia. For Biosecurity New Zealand, 82 pp.

**CONAF 2011**. “Catastro y Evaluación de los Recursos Vegetacionales Nativos de Chile, Sección de monitoreo de ecosistemas forestales. [En línea]. Consulta: 18 de Abril, 2016. Disponible en <<http://sit.conaf.cl/>>.

**COX, E. 1996**. Identification of Freshwater Diatoms From Live Material. Chapman & Hall. London.

**CULLIS, JDS; PACKMAN, A; GILLIS, C.A; HASSAN M; BOTHWELL, M.L. Y KILROY, C. 2012**. A conceptual model for the blooming behavior and persistence of the benthic mat-forming diatom *Didymosphenia geminata* in oligotrophic streams. *Journal of Geophysical Research* 117: G00N03.

**DÍAZ, C; MOLINA, X; Y MONTECINO, V. 2012**. Manual para el monitoreo e identificación de la microalga bentónica *Didymosphenia geminata*, Producido por POCH-Universidad de Chile y financiado por la Subsecretaría de Pesca y Acuicultura, Diseño e impresión Mensage, 74 pp.

**DORMANN, C; PURSCHKE, O; GARCÍA MÁRQUEZ, J. R; LAUTENBACH, S. Y SCHRODER, B. 2008**. Components of uncertainty in species distribution analysis: a case study of the great grey shrike. *Ecology*, vol. 89, p. 3371-3386.

**ELITH, J. Y LEATHWICK, J.R. 2009**. Species Distribution Models: Ecological Explanation and Prediction, Across Space and Time. *Annual Review of Ecology. Evolution. and Systematics*. 40 (1), 677–697.

**ELITH, J., PHILLIPS, S. J; HASTIE, T; DUDÍK, M; CHEE, Y. E. Y YATES, C. J. 2011.** A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17: 43–57.

**FAWCETT. 2006.** An introduction to ROC analys. *Pattern Recognition. Letters* 27 (2006) 861–874

**FAO/CEPE. 1991.** Legislation and Measures for the Solving of Environmental Problems Resulting from Agricultural Practices (With Particular Reference to Soil, Air and Water), Their Economic Consequences and Impact on Agrarian Structures and Farm Rationalization. Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa, (CEPE) Y FAO, Agri/Agrarian Structures and Farm Rationalization Report No. 7. Naciones Unidas, Ginebra.

**GILLIS, C.A. Y CHALIFOUR, M. 2008.** Changes in the macrobenthic community structure following the introduction of the invasive algae *Didymosphenia geminata* in the Matapedia River (Quebec, Canada). *Hydrobiologia* 647 (1), 63–70,

**GUIBAN, A. Y ZIMMERMANN, N.E. 2000.** Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135 (2–3), 147–186.

**GUIBAN, A. Y THUILLER, W. 2005.** Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecol. Lett.* 8: 993-1009.

**HIRZEL, A. H., J. HAUSSER, CHESSEL, D. Y PERRIN N. 2002.** Ecological-niche factor analysis: how to compute habitat-suitability maps without absence data. *Ecology* 83:2027-2036.

**JAMES, D.A; MOSEL, K. & CHIPPS, S.R. 2013.** The influence of light, stream gradient, and iron on *Didymosphenia geminata* bloom development in the Black Hills, South Dakota. *Hydrobiologia*. 721: 117–127.

**JIMÉNEZ-VALVERDE, A., LOBO, J. M. Y HORTAL, J. 2008.** Not as good as they seem: the importance of concept in species distribution modelling. *Diversity and Distributions* 14:885-890.

**KILROY, C. 2004.** A new alien diatom, *Didymosphenia geminata* (Lyngbye) Schmidt: its biology, distribution, effects and potential risks for New Zealand fresh waters, NIWA, Christchurch, New Zealand, 34p.

**KILROY, C. 2005.** Test to determine the effectiveness of methods for decontaminating materials that have been in contact with *Didymosphenia geminata*: National Institute of Water and Atmospheric Research. New Zealand, Client Report, CHC2005-005, NIWA Project MAF05501.

**KILROY, C. Y DALE M. 2006.** Biosecurity New Zealand, NIWA Client Report: CHC2006-078, NIWA Project: MAF06509.

**KOTHANDARAMAN, V. Y EVANS, R.L. 1972.** Use of air-water relationships for predicting water temperature. Illinois State Water Survey, Urbana, Report Investigation 69.

**KUMAR, S; SPAULDING, S; STOHLGREN, T; HERMANN, K; SCHMIDT, T Y BAHLS, L. 2009.** Potential habitat distribution for the freshwater diatom *Didymosphenia geminata* in the continental US. *Front. Ecol. Environ*, 7, 415–420.

**LILLO, D; ZAMORANO, D; DÍAZ, C. Y PEREDO-PARADA, M. 2016.** Factores que determinan la colonización de *Didymosphenia geminata* en ríos del sur de Chile. Conferencia: XII Congreso de la Sociedad Chilena de Limnología.

**MONTECINOS, V; MOLINA, X; KUMAR, S; CASTILLO, M Y BUSTAMANTE R. 2014.** Niche dynamics and potential geographic distribution of *Didymosphenia geminata* (Lyngbye) M. Schmidt an invasive freshwater diatom in Southern Chile. *Aquatic Invasions* Volume 9, Issue 4: 507–519.

**MORALES, E; RIVERA, S; VEIZAGA, A. Y FIORINI, R. 2012.** *Didymosphenia geminata* (Lyngbye) M. Schmidt (Bacillariophyta), an invasive species and potential threat to Bolivian aquatic ecosystems. *ACTA NOVA* pp, 327-343.

**NAOKI, K; GÓMEZ, M; LÓPEZ, P; MENESES, R. Y VARGAS J. 2006** Comparación de Modelos de distribución de especies para predecir la distribución potencial de vida silvestre en Bolivia. *Ecología en Bolivia*. 41(1): 65–78.

**NTSG 2011.** “MODIS Global Evapotranspiration Project (MOD16)” [En línea], Consulta: 18 de Abril, 2016, Disponible en < <http://www.ntsg.umd.edu/data> >.

**PHILLIPS, S.J; ANDERSON, R.P; Y SCHAPIRE, R.E. 2006.** Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190 (3–4), 231–259.

**PLISCOFF, P. Y FUENTES-CASTILLO, 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. *Revista de Geografía Norte Grande* 48:61-79.

**POULOS, H.M; CHERNOFF, B; FULLER, P. Y BUTMAN D. 2012.** Ensemble forecasting of potential habitat for three invasive fishes. *Aquatic Invasions* 7: 59-72,

**R DEVELOPMENT CORE TEAM. 2014.** R: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, ISBN 3-900051-07-0, [En línea], Consulta: 18 de Agosto, 2016. Disponible en: <<http://www.Rproject.org/>>.

**SANTAGELO, A. 2014.** Invasive species of the Pacific Northwest: Didymo: *Didymosphenia geminata*. Washington Department of Ecology.

**SERNAGEOMIN 2003**, “Mapa geológico de Chile: versión digital” [En línea]. Consulta: 18 de Abril, 2016. Disponible en < <http://www.ipgp.fr/~dechabal/Geol-mil>>.

**SPAULDING, S, Y ELWELL, W. 2007**, Increase in nuisance blooms and geographic expansion of the freshwater diatom *Didymosphenia geminata*: Recommendations for response. EPA Region 8 and Federation of Fly Fishers. Denver, Colorado, USA.

**SUBPESCA 2010**, R, Ex, N° 3064-2010: Declara área de Plaga sectores de cuerpos de agua terrestres. [En línea]. Consulta: 18 de Abril, 2016. Disponible en <[http://www.subpesca.cl/normativa/605/articles-80139\\_documento.pdf](http://www.subpesca.cl/normativa/605/articles-80139_documento.pdf)>.

**SUBPESCA 2011**. Prospección de la presencia de *Didymosphenia geminata* en las regiones XIV, X, XI y XII elaboración de material de difusión tendiente a su control. POCH-UChile.

**SUBPESCA 2013**, Informe técnico D, AC N° 609/2013, Propuesta modifica y amplía resolución Ex, N°996/2013. Amplía área plaga de *Didymosphenia geminata* incluyendo unidades de subcuencas que se señalan para la Región de Magallanes y la Antártica Chilena.

**VAN NEIL, K.P; LAFFAN, S.W. Y LEES, B.G. 2004**. Effect of error in the DEM on environmental variables for predictive vegetation modelling. *Journal of Vegetation Science*, vol. 15, p. 747-756.

**WANG, X; HUANG, X; LIYUN, J. Y QIAO, G. 2010**. Predicting potential distribution of chestnut phylloxerid (Hemiptera: Phylloxeridae) based on GARP and MAXENT ecological niche models. *Journal of Applied Entomology* 134(1).

**WHITTON, B; ELLWOOD, N; Y KAWECKA, B. 2009**. Biology of the freshwater diatom *Didymosphenia*: a review. *Hydrobiology* 630:1-37 p.

**WISZ, M.S; HIJMANS, R.J; LI, J; PETERSON, A.T; GRAHAM, CH. y GUISAN, A. 2008**. Effects of sample size on the performance of species distribution models. *Divers. Distrib.* 14: 763-773.

**WORLDCLIM 2005**. “Data for current conditions (~1950-2000): BIOCLIM, [En línea], Consulta: 18 de Abril. 2016. Disponible en < <http://www.worldclim.org/current>>.