

# MODELAMIENTO DE LA DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DEL BOSQUE HÚMEDO DE MONTAÑA EN MICHOACÁN, MÉXICO Y SU APLICACIÓN EN EL ESTUDIO DE LA CONECTIVIDAD DEL PAISAJE

Camilo Andrés CORREA AYRAM<sup>a</sup>, Manuel E. MENDOZA<sup>a</sup>, Andrés ETTER<sup>b</sup>, Diego R. PÉREZ SALICRUP<sup>c</sup>,

<sup>a</sup> Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, antigua carretera a Pátzcuaro no. 8701, col. ex-hacienda de San José de la Huerta CP 58190, Morelia, Michoacán, México. 52 (443) 322 38 39. [correa.camilo@gmail.com](mailto:correa.camilo@gmail.com). <sup>b</sup> Facultad de Estudios Ambientales y Rurales, Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá, Kr 7 # 40-62, Bogotá, Colombia. <sup>c</sup> Centro de Investigaciones en Ecosistemas, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua carretera a Pátzcuaro no. 8701, col. ex hacienda de San José de la Huerta CP 58190, Morelia, Michoacán México. 52 (443) 332 27 08

## 1 INTRODUCCIÓN

En el estado de Michoacán, los Bosques Húmedos de Montaña (BHM) se encuentran generalmente inmersos entre los bosques de pino y bosques mixtos de pino-encino, hoy en día dispersos en relictos fragmentados principalmente por los cultivos del aguacate, la tala ilegal y la extracción de madera para carbón (CONABIO, 2010; Barsimantov y Antezana, 2012). Así mismo, se ha identificado que bajo condiciones naturales se distribuyen en un patrón espacial discontinuo a lo largo del Sistema Volcánico Transversal de Michoacán (SVT<sub>Mich</sub>) (CONABIO, 2010). Se han elaborado estudios de la ocurrencia potencial del BHM a nivel nacional (Cruz-Cárdenas et al., 2012) ofreciendo información relevante acerca de su distribución y configuración espacial (CONABIO, 2010). Sin embargo, la resolución espacial que se ha utilizado en estos modelos ( $\geq 1 \text{ km}^2$ ) no permite conocer de manera detallada el aporte de su distribución actual a la conectividad del paisaje. Recientemente, Cuervo-Robayo et al. (2014), actualizaron los datos bioclimáticos disponibles para México con el propósito de fortalecer los modelos previos y mejorar su calidad, lo que permite mejorar la resolución espacial de los modelos de distribución potencial y eventualmente, evaluar los cambios de la conectividad. La conectividad del paisaje permite identificar la red de elementos del paisaje ecológicamente interconectados. El enfoque de teoría de grafos ha sido ampliamente utilizado en

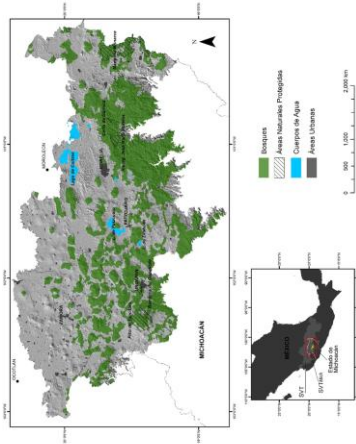
ecología del paisaje para identificar y analizar las redes ecológicas con fines de conservación, con la finalidad de incrementar la conectividad, o para evaluar el impacto de obras de infraestructura (Urban y Keitt, 2001, Zetterberg et al., 2010). El propósito de este trabajo fue analizar la conectividad de los bosques húmedos de montaña para identificar áreas prioritarias de conservación, tomando como referente su distribución potencial y su relación con otros ecosistemas montanos. Se construyó un modelo predictivo de la distribución potencial del BHM y se analizó la contribución potencial en la conectividad del paisaje. Con base en lo anterior se identificaron las áreas prioritarias para mantener y mejorar la conectividad en el marco de la gestión de la conservación de los BHM.

## 2. METODOLOGÍA

### Área de estudio

El Sistema Volcánico Transversal de Michoacán (SVT<sub>Mich</sub>) ocupa un área de 28,100 km<sup>2</sup> y un rango altitudinal entre los 1,000 y 3,800 m (Figura 1). Este sector se caracteriza porque reúne las condiciones bioclimáticas idóneas para la distribución de los bosques de coníferas (BC) y en menor proporción los bosques húmedos de montaña (BHM). La ocurrencia de BHM requiere de humedad relativa alta, un ambiente montañoso, suelos con una capa profunda de hojarasca y clima templado (Velázquez et al., 2000). Los BHM en el SVT<sub>Mich</sub> actualmente se encuentran en estado relictual y presentan una superficie aproximada

muy reducida de 79 Km<sup>2</sup> (0.28% del SVT<sub>Mich</sub>) (INEGI, 2005).



**Figura 1.** Localización del área de estudio, indicando las coberturas actuales de bosque en el Sistema Volcánico Transversal de Michoacán -SVT<sub>Mich</sub> (INEGI, 2005).

### Modelamiento espacial de la distribución potencial de los Bosques Húmedos de Montaña (MDP BHM) y de los Bosques de Coníferas (BC)

Para identificar la matriz original del BHM y analizar su papel en la conectividad del paisaje, adicionalmente al MDP BHM se elaboró un modelo de distribución potencial del Bosque de Coníferas (MDP BC) asumiendo que el BHM se encuentra inmerso dentro de ella. Para la modelación de la distribución potencial de los dos tipos de bosques, se utilizó el software MaxEnt 3.3.3 (Philips et al. 2006).

#### -Datos de ocurrencia y variables predictoras

Para la elaboración del modelo de distribución potencial se utilizaron datos de ocurrencia de los dos tipos de bosque de la siguiente manera: Bosque Húmedo de Montaña: (a) 72 Registros de presencia de BHM basados en levantamientos de vegetación para la caracterización de especies diagnósticas de BHM (Santana et al, 2014); y (b) 23 Datos de ocurrencia obtenidos de las bases de datos de INEGI (2005) para Michoacán y datos de presencia de BHM con base en estudios de vegetación en el área de estudio. Bosque de Coníferas: Se utilizaron 167 puntos de ocurrencia

de 7 especies representativas del BC en Michoacán. Se seleccionaron un total de 27 variables predictoras divididas en 2 grupos: a) Variables bioclimáticas: se seleccionaron 20 variables de 30 m de resolución, 19 desarrolladas por Cuervo-Robayo, et al., (2014). Se incluyó una variable bioclimática adicional correspondiente a evapotranspiración basada en el modelo de Turc (1954) (Cruz-Cárdenas et al., 2012) (Tabla 1). b) 7 Variables topográficas.

Categoría	Código	Variable
Bioclimáticas	bio1	Temperatura media anual
	bio2	Media del rango de T diario
	<b>bio3</b>	<b>T media de la máxima del mes más cálido</b>
	<b>bio4</b>	<b>T media de las mínimas del mes más frío</b>
	bio5	Rango anual calculado como B03-B04
	bio6	Isotermalidad calculada como B02/B05
	bio7	Desviación estándar de la T mensual
	bio8	T media del cuatrimestre más húmedo
	bio9	T media del cuatrimestre más seco
	bio10	T media del cuatrimestre más cálido
	bio11	T media del cuatrimestre más frío
	<b>bio12</b>	<b>Precipitación media anual</b>
	<b>bio13</b>	<b>P media del mes más húmedo</b>
	<b>bio14</b>	<b>P media del mes más seco</b>
	<b>bio15</b>	<b>Rango anual de P, calculado como B14-B13</b>
	bio16	P total media del cuatrimestre más húmedo
	bio17	P total media del cuatrimestre más seco
	bio18	P total media del cuatrimestre más cálido
	bio19	P total media del cuatrimestre más frío
Topográficas	<b>EvTR</b>	<b>Evapotranspiración</b>
	asp_class	Orientación
	curv	Curvatura
	dem30m	Altitud
	rect_twi	Índice de humedad topográfica
	rugg	Rugosidad
	slope	Pendiente
TPI	Índice de posición topográfica	

**Tabla 1.** Variables predictoras empleadas en el estudio para modelar la ocurrencia potencial de BHM. *Nota:* Las variables en negritas corresponden a las usadas para el modelamiento final de BHM y BC.

Para reducir la redundancia entre variables predictoras se realizó un análisis de correlación cruzado (coeficiente de correlación de Pearson (*r*)). Este procedimiento llevó a la exclusión de 10 variables, por lo que para el modelamiento final se utilizaron 17 variables (Tabla 1). Para identificar las áreas óptimas para la presencia de BHM y BC se aplicó el rango de aceptación utilizado en Pearson (2007) del *10 percentile training presence logistic threshold*. Todos los píxeles mayores al umbral de aceptación preliminarmente se reclasificaron como BHM o BC potencial. Para establecer el grado de superposición de los dos modelos (*niche overlap*) y lograr un ajuste de la distribución del BHM teniendo en cuenta su relación espacial con los BC, se aplicó la prueba de rango relativo (Warren y Seifert, 2010). Se asumió que los valores bajos de probabilidad de ocurrencia del BHM en algunos sectores del SVT<sub>Mich</sub> podrían

corresponder al BC potencial. En este sentido, para evitar la sobreestimación del MDP BHM final, se construyó un criterio de ajuste de los valores de ocurrencia, en donde todos los valores de la diferencia entre los modelos preliminares de MDP BHM y MDP BC mayores a 0 se asignaron a BHM, mientras que los valores de 0 o menores se asignaron a BC.

-Análisis de conectividad del paisaje y priorización de áreas

Elaboración del modelo de conectividad basado en grafos

Utilizando el mapa binario de distribución potencial de BHM se construyeron dos grafos de extensión espacial diferente (Foltête et al., 2014): 1) Uno general utilizando los límites del SVT<sub>Mich</sub> como matriz del paisaje para analizar el rol de las áreas potenciales de BHM en la conectividad del SVT<sub>Mich</sub>. 2) otro grafo teniendo en cuenta la distribución potencial del bosque de coníferas (BC) como matriz del paisaje para analizar la importancia de las áreas potenciales de BHM como elementos conectores y/o dispersores dentro de otros tipos de bosque. Como umbral de conectividad se utilizó una distancia de dispersión media generalizada de 10,000 m ( $d=10,000$ ) basada en los requerimientos del gato montés mexicano (*Linx rufus escuinapae*) que habita en el SVT<sub>Mich</sub> (Correa et al., 2014). Para analizar el cambio en el grado de conectividad general ( $PC_{overall}$ ) se utilizaron varias distancias de dispersión que pueden ser representativas de mamíferos pequeños a grandes:  $d=50m$ ,  $d=100m$ ,  $d=500m$ ,  $d=1,000m$ ,  $d=5,000m$ ,  $d=10,000m$ ,  $d=20,000m$ . Las conexiones entre los nodos (*link geometry*) se basaron en distancias euclidianas (Pascual-Hortal y Saura, 2008).

Evaluación de la importancia de los parches para la conectividad

Se evaluó la conectividad de cada modelo de grafos por medio del índice de probabilidad de conectividad ( $PC$ ) propuesto en Saura y Pascual-Hortal (2007). Para analizar la importancia individual de los parches potenciales de BHM en la conectividad general del Bosque de Coníferas y

del SVT<sub>Mich</sub>, se aplicó el porcentaje de importancia del índice  $PC$  ( $dPC_k$ ) (Ver detalles de los índices en Saura y Pascual-Hortal, 2007; Saura y Rubio, 2010). Para analizar las distintas formas en las que los parches de BHM potencial pueden contribuir a la conectividad en el área de estudio y dentro de BC, se analizó el índice  $PC$  con base en las tres fracciones que lo componen (Bodin y Saura, 2010): 1)  $dPC_{intra_k}$  (*intra patch connectivity*) corresponde al área conexa existente entre los parches de hábitat. 2)  $dPC_{flux_k}$  (*interpatch connectivity*) corresponde al flujo de dispersión ponderado por el atributo del parche (en este caso, área del parche  $k$  ponderado por la probabilidad media de ocurrencia del mismo parche  $k$ ) recibido u originado través de los enlaces del parche  $k$  con el resto de parches que conforman el paisaje. 3)  $dPC_{connector_k}$  evalúa el papel del parche  $k$  como elemento conector entre las demás áreas de hábitat (*stepping stones*), mide la importancia del parche  $k$  como elemento potenciador de la conectividad (Bodin y Saura, 2010; Saura, 2013). Se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson para evaluar las diferencias y medir el grado de relación entre los valores de las tres fracciones de  $dPC_k$ , el atributo  $k$  y el área del parche  $k$ . Para evaluar la contribución relativa de cada fracción  $dPC_k$  en la importancia de la conectividad general ( $\theta PC_{intra}$ ,  $\theta PC_{flux}$ ,  $\theta PC_{connect}$ ) se sumaron los valores totales de  $dPC$  y se dividieron por la suma de los valores de cada fracción, el resultado se multiplicó por 100 para interpretarlo como porcentaje (Saura y Rubio, 2010). Este mismo método también se aplicó a cada uno de los sectores en los que se dividió el MDP BHM para facilitar el análisis de los resultados (Figura 3).

## RESULTADOS

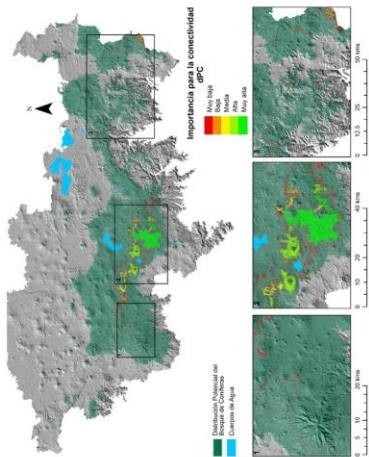
Distribución potencial de los Bosques en el SVT<sub>Mich</sub>: Bosque Húmedo de Montaña (BHM). El área óptima para la presencia del BHM correspondió a 37,567 ha, lo que representa el 1.3 % del SVT<sub>Mich</sub>. El 97 % del BHM potencial se distribuyó entre los 2000 y 3000 m (75% entre 2000 y 2500 m y 22% entre 2500 y 3000 m). Solamente el 7% de su área se encuentra dentro de alguna de las áreas protegidas presentes en la zona (2,625 ha). En general se identificaron tres sectores

donde se distribuyen las principales áreas de BHM (Figura 2): El sector 1 (oeste) se ubica en el cerro de Tancitaro, el sector 2 (centro) corresponde al área próxima al lago Zirahuén y es donde se concentran los valores más altos de probabilidad de ocurrencia, pero con ausencia de áreas protegidas, y el sector 3 (este) corresponde a las áreas que abarcan parcialmente los municipios de Zitácuaro e Hidalgo. Bosque de Coníferas (BC). El área del SVT<sub>Mich</sub> óptima para la presencia del BC correspondió a 691,068 ha, las cuales ocupan el 24 % del SVT<sub>Mich</sub>. (Fig 2). En su mayoría el BC potencial se concentra en la cadena montañosa ubicada en el sur del SVT<sub>Mich</sub>, formando prácticamente un corredor que enlaza el área de estudio con el sector central del SVT Mexicano.

**Análisis de conectividad y priorización de áreas**

**-Priorización de las áreas de BHM potencial para el mantenimiento de la conectividad del paisaje**

En el sector 2 se agrupó el área más importante para la conservación de la conectividad con un valor de importancia del 77.5% basada en una distancia de dispersión media de 10,000 m ( $d=10,000$ ). El porcentaje restante se distribuye entre los demás parches y ninguno sobrepasó el 20 % de importancia. En el sector 1 predominan parches con muy bajo valor del índice  $dPC$  y en el sector 3 se distinguen áreas potenciales con valores de importancia entre muy bajos a altos.



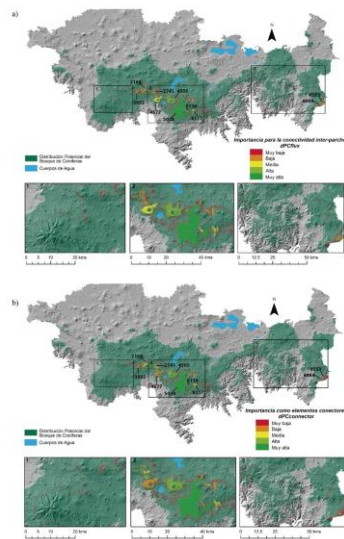
**Figura 2.** Distribución de la importancia de las áreas potenciales de BHM en la conectividad general del paisaje basado en el índice de probabilidad de conectividad ( $dPC$ ).

**-Importancia del BHM potencial como proveedor de conectividad intra-parche**

El área potencial de BHM que más aporta a la conectividad intra- parche (34.8%), corresponde también a la que presenta el tamaño más grande (11,250 ha) y valor más alto de atributo (3,036). En este sentido, las áreas potenciales de BHM con mayor valor de atributo ( $ha \times$  aptitud de hábitat) son las más importantes para la conectividad intra-parche. Específicamente, la contribución del parche más grande ubicado en el sector 2 (Id 5038) concentra la mayoría de área conexas dentro del BC potencial.

**-Importancia del BHM potencial como proveedor o receptor de flujos de dispersión**

El área potencial de BHM con mayor importancia en la fracción  $dPC_{flux}$  (35.4%) correspondió al área del Id 5038, la cual también presentó el valor de atributo  $k$  más alto. Sin embargo, los valores de  $dPC_{flux}$  son más altos en comparación a  $dPC_{intra}$  (p.e. áreas con Id 4505, Id 8117 e Id 8138); lo que indica que hay mayor contribución del BHM potencial como proveedor de conectividad inter-parche.



**Figura 3.** Importancia de las áreas potenciales de BHM como proveedores de conectividad basado en las fracciones  $dPCflux$  (a) y  $dPCconnector$  (b). **Nota:** Los números en la figura corresponden al código (columna Id en tabla 3) utilizado para identificar los 10 parches potenciales de BHM con valores más altos de atributo  $k$ .

-Importancia de las áreas potenciales de BHM como elementos conectores del paisaje

En general los valores de  $dPCconnector_k$  fueron bajos en comparación a las demás fracciones y al índice  $dPCK$ . Las correlaciones entre  $dPCconnector_k$  y las demás fracciones fueron bajas (cercasas a 0). Sin embargo, la correlación entre  $dPCK$  y  $dPCconnector_k$  se incrementa considerablemente de 0.61 a 0.77 cuando es excluida el área de hábitat con mayor valor de atributo (Id 5038).

## DISCUSIÓN

-Modelamiento de la distribución potencial del BHM

El modelo de distribución resultante permitió diferenciar el BHM de las áreas potenciales del BC con las que tienden a confundirse debido a que estos dos tipos de vegetación ocurren en áreas ecológicamente similares dentro del área de estudio (CONABIO, 2010). Esto puede estar dado por una alta capacidad predictiva obtenida a través de las variables ambientales utilizadas, como la precipitación total media del cuatrimestre más frío ( $bio19$ ), variables topográficas como la altitud ( $dem30m$ ) y la orientación ( $asp\_class$ ), y además por el ajuste del modelo final por medio de la sustracción entre las probabilidades de ocurrencia de los dos modelos.

-Análisis de conectividad del paisaje y priorización de áreas

Contribución original del BHM a la conectividad general del paisaje

Las áreas potenciales de BHM ubicadas en el centro del  $SVT_{Mich}$  (sector 2) serían las más importantes para poder incrementar la conectividad general en el área de estudio (Fig 3.). Sin embargo, actualmente estas áreas en su mayoría han sido deforestadas para ser destinadas a la agricultura, en

especial para el cultivo del aguacate (Barsimantov y Antezana, 2012).

Diferentes formas en que las áreas de BHM potencial contribuyen a la conectividad del paisaje

A pesar de que la conectividad general del BHM potencial fue baja, el aporte en términos de conservación de la biodiversidad en el  $SVT_{Mich}$  puede ser importante debido a que las superficies potenciales de BHM presentan una alta capacidad para la dispersión de flujos ecológicos entre un área potencial en particular (que puede servir como origen o destino de los flujos) y las demás (dominio de  $\theta PCflux$ ), cómo lo demuestran los altos valores de importancia obtenidos en la fracción  $dPCflux$ , del área con mayor valor de atributo  $k$  localizada en el sector 2 (Id 5038, Fig 4). En este sentido, en la actualidad esta capacidad se ha perdido en su mayoría si se tiene en cuenta que dicha área se encuentra en estado relictual. Se observó que en condiciones naturales el BHM debió tener un rol importante como proveedor de conectividad inter-parche debido a la alta contribución en la fracción  $connector$  ( $dPCconnector$ ), por lo que los resultados sugieren que el patrón discontinuo que presenta era adecuado para contribuir a la conectividad como hábitats puente o de paso (stepping stones) entre otras áreas con alta aptitud de hábitat (Saura et al., 2014).

## CONCLUSION

Este estudio es un aporte importante para el conocimiento de la distribución potencial del BHM en México, con una resolución espacial no reportada hasta el momento. Además, es un aporte útil para la conservación de los ecosistemas de montaña en México porque permite conocer la contribución a la conectividad del paisaje bajo condiciones naturales, la cual es generalmente reportada para paisajes transformados y permite hacer una evaluación detallada de las diferentes formas en que la pérdida de las áreas de hábitat podría impactar en la conectividad.

## REFERENCIAS

- Barsimantov, J., & Navia Antezana, J. (2012). Forest cover change and land tenure change in Mexico's avocado region: Is community forestry related to reduced deforestation for high value crops? *Applied Geography*, 32(2), 844-853.
- Bodin, Ö., & Saura, S. (2010). Ranking individual habitat patches as connectivity providers: Integrating network analysis and patch removal experiments. *Ecological Modelling*, 221(19), 2393-2405.
- CONABIO. (2010). The Humid Mountain Forest in Mexico: Threats and Opportunities for Conservation and Sustainable Management). *El Bosque Mesófilo de Montaña en México: Amenazas y Oportunidades para su Conservación y Manejo Sostenible*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 197 pp. México D.F., México.
- Correa Ayram, C. A., Mendoza, M. E., Pérez Salicrup, D. R., & López Granados, E. (2014). Identifying potential conservation areas in the Cuitzeo Lake basin, Mexico by multitemporal analysis of landscape connectivity. *Journal for Nature Conservation*, 22(5), 424-435.
- Cruz-Cárdenas, G., Villaseñor, J. L., López-Mata, L., & Ortiz, E. (2012). Potential distribution of Humid Mountain Forest in Mexico. *Botanical Sciences*, 90(3), 331-340.
- Cuervo-Robayo, A. P., Téllez-Valdés, O., Gómez-Albores, M. A., Venegas-Barrera, C. S., Manjarrez, J., & Martínez-Meyer, E. (2014). An update of high-resolution monthly climate surfaces for Mexico. *International Journal of Climatology*, 34(7), 2427-2437.
- INEGI. (2005). *Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación*, escala 1 : 250 000, serie III (continuo nacional). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Aguascalientes.
- Pascual-Hortal, L., & Saura, S. (2006). Comparison and development of new graph-based landscape connectivity indices: towards the prioritization of habitat patches and corridors for conservation. *Landscape Ecology*, 21(7), 959-967. doi: 10.1007/s10980-006-0013-z
- Pascual-Hortal, L., & Saura, S. (2008). Integrating landscape connectivity in broad-scale forest planning through a new graph-based habitat availability methodology: application to capercaillie (*Tetraurogallus*) in Catalonia (NE Spain). *European Journal of Forest Research*, 127(1), 23-31. doi: 10.1007/s10342-006-0165-z
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3-4), 231-259.
- Rubio, L., & Saura, S. (2012). Assessing the importance of individual habitat patches as irreplaceable connecting elements: An analysis of simulated and real landscape data. *Ecological Complexity*, 11(0), 28-37.
- Saura, S., & Rubio, L. (2010). A common currency for the different ways in which patches and links can contribute to habitat availability and connectivity in the landscape. *Ecography*, 33(3), 523-537. doi: 10.1111/j.1600-0587.2009.05760.x
- Saura, S., & Pascual-Hortal, L. (2007). A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning: Comparison with existing indices and application to a case study. *Landscape and Urban Planning*, 83(2-3), 91-103.
- Urban, D., & Keitt, T. (2001). Landscape Connectivity: A Graph-Theoretic Perspective. *Ecology*, 82(5), 1205-1218. doi: 10.2307/2679983
- Warren, D. L., & Seifert, S. N. (2010). Ecological niche modeling in Maxent: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria. *Ecological Applications*, 21(2), 335-342.