



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**Evaluación de cinco grupos taxonómicos como  
subrogados en la Faja Volcánica Transmexicana**

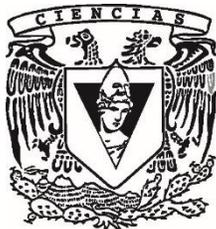
**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**BIÓLOGA**

**P R E S E N T A :**

**ANA MARÍA VARELA ANAYA**



**DIRECTORA DE TESIS:  
DRA. TANIA ESCALANTE ESPINOSA**

**CIUDAD DE MÉXICO 2019**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Hoja de datos del jurado

### **1. Datos del Alumno**

Varela

Anaya

Ana María

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Biología

310136035

### **2. Datos del tutor:**

Dra.

Tania

Escalante

Espinosa

### **3. Datos del sinodal 1:**

Dra.

Leticia Margarita

Ochoa

Ochoa

### **4. Datos del sinodal 2:**

Biol.

José Gerardo

Rodríguez

Tapia

**5. Datos del sinodal 3:**

Dr.

David Alexander

Prieto

Torres

**6. Datos del sinodal 4:**

Dra.

Ángela Patricia

Cuervo

Robayo

**7. Datos del trabajo escrito**

Evaluación de cinco grupos taxonómicos como subrogados en la Faja Volcánica

Transmexicana

61 p

2019

*“La perfección ha de llegar cuando jugamos nuestros juegos.  
Es muy importante porque si pensamos que no necesitamos  
esta perfección, no nos tomaríamos nuestros juegos en serio y  
entonces todo sería en vano”.*

Ingmar Bergman

# Índice

Agradecimientos.....	1
Resumen.....	3
Introducción .....	4
1. ¿Qué es un Subrogado?.....	4
2. Pruebas a priori y a posteriori.....	5
2.1. Programas para la identificación de áreas de conservación: Zonation .....	7
2.2. Algoritmo Core-Area Zonation (CAZ) .....	8
2.3. Coeficiente de correlación r de Pearson .....	9
4. Estudios previos en la evaluación de subrogados .....	10
5. Características bióticas y abióticas de la Faja Volcánica Transmexicana .....	12
Justificación .....	15
Objetivos .....	17
Objetivo general .....	17
Objetivos particulares .....	17
Hipótesis .....	18
Método .....	19
1. Área de Estudio .....	19
2. Recopilación de datos .....	19
3. Modelación de la distribución geográfica de las especies .....	20
4. Identificación y evaluación de subrogados.....	22
4.1 Prueba a priori .....	23
4.2 Prueba a posteriori .....	24
Resultados y Discusión.....	25
1. Patrones de distribución geográfica de la especies .....	25

2. Evaluación de subrogados mediante la prueba a priori .....	25
3. Evaluación de subrogados mediante la prueba a posteriori .....	30
Conclusiones .....	40
Anexo 1. Detalles de los datos usados en la modelación de la distribución geográfica .....	41
Anexo 2. Efectividad de los subrogados.....	47
Referencias.....	51

## **Agradecimientos**

A la Universidad Nacional Autónoma de México, la Facultad de Ciencias y al Laboratorio de Biogeografía de la Conservación por haberme dado la oportunidad de estudiar y formarme profesionalmente.

Este trabajo se realizó gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de DGAPA-UNAM, mediante el desarrollo del proyecto PAPIIT IN217717 titulado “*Planeación sistemática de la conservación en la Faja Volcánica Transmexicana*”, el cual a su vez permitió la obtención de una beca escolar que facilitó la elaboración de esta tesis.

A mi asesora, la Doctora Tania Escalante Espinosa y los sinodales asignados: Dra. Leticia Margarita Ochoa Ochoa, Biol. José Gerardo Rodríguez Tapia, Dr. David A. Prieto Torres y Dra. Ángela Patricia Cuervo Robayo por todo su tiempo y las sugerencias proporcionadas.

A los proveedores de las bases de datos: Leticia Ochoa-Ochoa, Adolfo G. Navarro-Sigüenza, Oswaldo, Ana L. Gutiérrez-Velázquez, Pedro Reyes-Castillo<sup>†</sup>, Gonzalo Pinilla-Buitrago, Héctor M. Hernández, Carlos Gómez- Hinostrosa, Oswaldo Téllez-Valdés, César Miguel-Talonia. A Gerardo Rodríguez-Tapia por compartirme la información ambiental de las variables bioclimáticas y topográficas que utilice; y a la Dra. Clarita Rodríguez-Soto por el asesoramiento en el manejo del software Zonation.

Al Dr. Elkin A. Noguera Urbano por todo el apoyo y tiempo que me brindó durante la realización de esta investigación, gracias por los consejos y especialmente por su amistad.

Agradezco igualmente a Luis José Aguirre López por brindarme todo su apoyo, por sus consejos y amistad durante mi estancia en el laboratorio, así como al Dr. Erick García Trejo a Silvia, Karla, Willie, Kevin y Carolina por la grata compañía.

A mi familia que son mi inspiración, mis padres, Gerardo Varela y Elvia Anaya por todo el apoyo incondicional que he tenido durante toda mi vida, por su cariño, enseñanzas y por ser grandes modelos a seguir. A mi hermana Dulce por los consejos, enseñanzas y apoyo que siempre me ha dado, siempre ha sido un modelo a seguir.

A mis amigos. A Sandra por trece años de amistad, por su apoyo en los momentos más difíciles de mi vida, así como a Raúl, Eduardo y Adán por todos nuestros años de amistad.

A Monserrat (Zthivi), Karen, Fernanda, José Luis, Yak y Víctor por los buenos momentos que hemos pasado juntos, por su apoyo en los momentos más difíciles de mi vida, valoro mucho su amistad, así como a todas las amistades que hice durante mi estancia en el CCH Azcapotzalco.

Als gossos: Laura, Ricardo, Germán, Adolfo, Adam i Andrea per la seva amistat, els bons moments per la seva ajuda, els seus consells, per aixecar-me l'ànim, per obrir-me la ment amb els seus particulars coneixements, per ensenyar-me una cultura maca durant aquests dos anys.

A mis amigos de la Universidad. A Yair, José Juan, Karen Rodríguez, Paulina, Alfredo López y Zaira por los buenos momentos que viví a su lado tanto en la Facultad como en las prácticas de campo y por sus consejos, así como a todas las amistades que hice durante esta etapa de mi vida. A Amilcar por brindarme su apoyo siempre que lo necesité, por los ánimos, consejos y los buenos momentos.

A Oso, Chiqui y Dartai, por enseñarme a ser una mejor persona y darle alegría a mi vida.

## Resumen

Considerando el limitado tiempo y escasos recursos de financiamientos para el desarrollo de estudios de investigación y conservación para obtener datos “*especie por especie*” de una determinada área de estudio, frecuentemente la identificación de áreas prioritarias emplea particulares grupos taxonómicos como subrogados o indicadores, de los valores de diversidad de una región de interés. A pesar que los valores de subrogación de los taxones han sido evaluados en diversos contextos, aún no están del todo claras las tendencias generales en su efectividad. En la presente investigación se evaluó el grado de efectividad, en términos de representatividad, de diferentes grupos taxonómicos, tanto por separado (anfibios, aves, insectos, mamíferos y plantas) como agrupados (invertebrados, plantas y vertebrados), para ser utilizados como subrogados de la biodiversidad en la Faja Volcánica Transmexicana (FVT). Se recopilaron datos geográficos de distribución de 167 especies, para las cuales se elaboraron modelos de distribución geográfica potencial. Posteriormente, la efectividad como subrogados de los grupos taxonómicos se evaluó mediante dos enfoques: (1) una prueba *a priori*, mediante una correlación de ‘*r*’ de Pearson, para determinar el grado de congruencia entre los patrones de riqueza espacial de los taxones; y (2) una prueba *a posteriori*, utilizando el programa Zonation v.4, a fin de determinar un sistema de áreas priorizadas para cada grupo taxonómico y estimar los grados de congruencias espacial y los valores de representatividad de especies obtenidos de los resultados de individuales. En general, se obtuvieron correlaciones mayores a 0.7 entre los patrones de riqueza de los grupos taxonómicos, aunque con poca correspondencia espacial ( $r < 0.5$  para el 100% de los casos) al considerar los valores de priorización de las áreas. De hecho, considerando como meta el proteger al menos un 17% de superficie de la FVT, se observó que solo un 9.98%, 7.18% y 3.24% de la superficie fue identificada congruentemente como sitios prioritarios por al menos cuatro, cinco y seis de los grupos taxonómicos, respectivamente. En general, los vertebrados, plantas y anfibios representan grupos taxonómicos considerados como potenciales candidatos subrogados para representar la biodiversidad de FVT, pues muestran valores de congruencia espacial promedio mayores al 30% (35%, 32% y 38%, respectivamente) con respecto al 17% de la superficie identificada como áreas prioritarias por el resto de los grupos analizados, llegando incluso a proteger más de la mitad de la riqueza de los demás taxones.

## Introducción

### 1. ¿Qué es un Subrogado?

El objetivo de la Biogeografía de la Conservación es proteger a la biodiversidad de las grandes extinciones, buscando la forma en el que se integre la biodiversidad al manejo de recursos naturales, y en el que las formas sustentables de vida sean un objetivo de igual relevancia (Margules y Sarkar, 2009). No obstante, la falta de datos completos de la diversidad biológica de cada lugar del planeta es un problema constante al que la biogeografía se enfrenta constantemente al momento de identificar los sitios prioritarios de conservación (Margules y Sarkar, 2009). Debido a que la biodiversidad es imposible de estimar o cuantificar en su totalidad, frecuentemente particulares grupos taxonómicos son utilizados como subrogados o indicadores de la biodiversidad de las áreas de interés de estudio. En este sentido, los subrogados son definidos como elementos utilizados para tratar de caracterizar o representar la biota total de una determinada región (Margules y Pressey, 2000; Beger *et al.*, 2007; Margules y Sarkar, 2009; Lindenmayer *et al.*, 2015; Beier y Albuquerque, 2016). Estos elementos son empleados, hoy en día, como una de las principales herramientas al momento de desarrollar los diversos protocolos en la Planeación Sistemática de la Conservación (Margules y Pressey, 2000), el cual es un enfoque integral de información biológica, social, política y económica implementado para proponer redes o sistemas de áreas protegidas —mediante pasos estructurados, metas mínimas de conservación, explícitas y mediables— para lograr establecer la conservación realmente representativa de la diversidad biológicas (Margules y Sarkar, 2009; Urquiza-Haas *et al.*, 2011) y así cumplir con las metas establecidas en el Convenio sobre la Diversidad Biológica (UNEP, 2010).

Desde esta perspectiva, los subrogados se eligen con la finalidad de que los mismos muestreen el espacio biológico o ambiental de manera uniforme. Sin embargo, la elección de los subrogados siempre estará delimitada por los datos disponibles o que pueden ser obtenidos al respecto de las características biológicas de las zonas de interés (Margules y Sarkar, 2009). En general, la combinación de información de un subconjuntos de especies, el conjuntos de especies (incluyendo hasta virus y bacterias) y los tipos de hábitats donde

éstas habitan son los subrogados más comúnmente utilizados en los estudios de conservación (Margules y Pressey, 2000; Margules y Sarkar, 2009; Lindenmayer y Likens, 2011). No obstante, es necesario considerar que el uso de este tipo de subrogados amerita la evaluación cuantitativa de sus ubicaciones o distribuciones geográficas dentro de las áreas de interés, pues este tipo de información permitirá la representación gráficas de las similitudes y/o diferencias entre los componentes de la diversidad biológica para la estimación de áreas de priorización (Margules y Pressey, 2000).

Existen dos grupos de subrogados: (1) los denominados “subrogados verdaderos”, los cuales pretenden representar a la biodiversidad general de un área de estudio mediante subgrupos o set de taxones específicos de especies amenazadas o endémicas; y (2) los conocidos como “subrogados estimados”, los cuales se basan en el supuesto de que exista un modelo biológico que los vincule con los componentes de la biodiversidad que conforman al conjunto de subrogados verdaderos, por ejemplo los parámetros climáticos y edáficos (Margules y Sarkar, 2009). Con base a ello, y considerando que si los datos del grupo de los subrogados verdaderos seleccionados están disponibles a la misma resolución espacial no hay necesidad de utilizar un conjunto de subrogados estimados (Margules y Sarkar, 2009), en la presente investigación se utilizaron especies endémicas de la Faja Volcánica Transmexicana (FVT). Para ello, aquí se define a las especies endémicas como grupos biológicos cuya área de distribución está restringida únicamente a la FVT (Noguera-Urbano, 2017).

## 2. Pruebas *a priori* y *a posteriori*

No existe un método estandarizado para evaluar la efectividad de los subrogados (Favreau *et al.*, 2006). No obstante, los métodos comúnmente utilizados para evaluar su eficacia pueden clasificarse en dos tipos de pruebas (Escalante *et al.*, datos no publicados): (1) la congruencia cruzada de taxones, definida como una prueba *a priori*, y (2) el desarrollo, como prueba *a posteriori*, de un sistema de áreas priorizadas. Desde esta perspectiva, es muy importante observar que las pruebas *a priori* generalmente incluyen la comparación de los patrones de riqueza entre los grupos o set de especies utilizadas. Este patrón se define como el número de especies que tiene un área con factores edáficos y variables ambientales

similares, por tal razón se espera que este patrón de concentración de especies pueda repetirse en diferentes grupos taxonómicos de la zona estudiada (Brown y Lomolino, 1998; Ávila-Sánchez *et al.*, 2018). Por su parte, las pruebas “*a posteriori*” se basan en el desarrollo de análisis espaciales mediante herramientas computacionales y programas como ConsNet (Ciarleglio *et al.*, 2009), Marxan (Ball y Possingham, 2000) y Zonation (Moilanen *et al.*, 2014) para identificar áreas prioritarias para la conservación. Para ambos casos los métodos son evaluados en términos del grado de congruencia espacial existente entre los patrones de los grupos: “subrogados utilizados” vs. “valores de diversidad a describir/conservar”

La congruencia espacial o congruencia cruzada de taxones (cross-taxa-congruence en inglés) existe cuando los patrones espaciales de riqueza o rareza de las especies coinciden en dos o más grupos taxonómicos. En general, la probabilidad de presentar congruencias entre los patrones de riqueza en un sitio dependerá de que la distribución de las especies sea más restringida, las cuales en términos de conservación aportan mayor información complementaria para la identificación de sitios con mayor biodiversidad (Arita *et al.*, 2018). Esto ha sido documentado en taxones en sistemas terrestres a escala global (Lamoreux *et al.*, 2006; Beger *et al.*, 2007) y/o nacional en países megadiversos como México (Urquiza-Haas *et al.*, 2011; 2019). En estos casos de estudio, los resultados obtenidos muestran que determinados grupos de organismos y/o grupos taxonómicos pueden, en general, ser utilizados como sustitutos para representar y cubrir las metas de conservación asignadas a otros taxones (Beger *et al.*, 2007; Lentini y Wintle, 2015). Sin embargo, esta evaluación *a priori* del rendimiento de un taxón como subrogado no siempre está aplicada antes de desarrollar los análisis de priorización de áreas de conservación (Beger *et al.*, 2007). Algo sumamente relevante si considerando que, por ejemplo en México, Urquiza-Haas y colaboradores (2011) observaron que si bien cualquiera de los grupos de vertebrados terrestres utilizados logra representar más de la mitad de las especies de los otros taxones, ninguno de hecho logra cubrir la totalidad de las especies examinadas dentro de las soluciones de priorización obtenidas.

## 2.1. Programas para la identificación de áreas de conservación: Zonation

En las últimas décadas, las herramientas computacionales han sido cada vez más utilizadas para la identificación de áreas prioritarias y/o complementarias para la conservación de la diversidad biológica. Si bien actualmente existen diversos algoritmos utilizados para asignar prioridades efectivas y eficientes (Lentini y Wintle, 2015), es importante observar que para todos los casos se requiere de mapas precisos de la distribución de los subrogados u objetos de conservación de interés. Dentro de las características de funcionamiento de cada programa podemos observar que ConsNet está diseñado para identificar redes de conservación de áreas para subrogados a través de su capacidad de realizar análisis interactivos continuos con objetivos de criterios múltiples (Ciarleglio *et al.*, 2009). Por otro lado, Marxan usa un análisis estadístico, el cual logra objetivos en específicos utilizando un enfoque de conjunto de costos-borde mínimo, mientras que Zonation utiliza un enfoque de cobertura máxima (Delavenne *et al.*, 2012). En este trabajo se utilizó el programa Zonation para identificar las áreas con mayor prioridad para la conservación de cada grupo taxonómico.

Zonation es una herramienta geoespacial desarrollada por Atte Moilanen y colaboradores en la Universidad de Helsinki, Finlandia, que ayuda en la planeación para la conservación de la biodiversidad utilizando principalmente datos e información de tipo *raster* (Di Minin *et al.*, 2014; Moilanen *et al.*, 2014). Este programa permite la identificación y calidad de áreas que son importantes para la conservación de la biodiversidad, proporcionando así un método cuantitativo para mejorar la persistencia de la biodiversidad a largo plazo (Di Minin *et al.*, 2014; Moilanen *et al.*, 2014). Además, la utilización de los costos en Zonation permite asignaciones rentables de los recursos mediante análisis, para la priorización de la conservación, tales como: la identificación de redes de reserva, expansión de las redes de reserva existentes de manera efectiva, identificación de áreas de bajo y alto valor ecológico para uso económico, y la priorización de áreas que pueden ser usadas para muchos propósitos (Moilanen *et al.*, 2014). Ante la realidad del siglo XXI, la funcionalidad de Zonation responde a la urgencia conservacionista a la que nos enfrentamos, pues su principal virtud es la selectividad de sitios.

En general, Zonation trabaja con cinco algoritmos (nombrados en inglés): (1) *Core-Area Zonation*, (2) *Additive benefit function*, (3) *Target-based benefit function*, (4) *Versatile generalized benefit function* y (5) *Radom ranking*; los cuales definen alternativos valores de percepción de conservación para la eliminación y optimización de píxeles (Moilanen *et al.*, 2014). Muchos conservacionistas consideran a este programa como una herramienta simple de implementar, ya que tiene un conjunto de métodos y análisis en paquetes fáciles de usar, en comparación de muchos otros programas de software con los mismos propósitos (Di Minin *et al.*, 2014; Albuerqueque y Beier, 2015). Los cinco algoritmos mencionados, permiten la identificación de sitios de alta prioridad que incentiva la precisión de las investigaciones científicas para el uso de las mismas.

## 2.2. Algoritmo Core-Area Zonation (CAZ)

La rareza es un término asignado principalmente a tres características de las especies: densidad de población, el tamaño del área geográfica ocupada o el número de hábitat diferentes que ocupa (Rabiowitz, 1981; Esparza-Olguín, 2004). Generalmente se les denomina especies raras a aquellas que presentan abundancias bajas y/o áreas geográficas pequeñas. En términos de conservación, las especies catalogadas como raras, se usan en proyectos de conservación con enfoque especial (rareza espacial) en la distribución geográfica (Lawler *et al.*, 2003), para conducir a estrategias de conservación en función de asegurar (como prioridad) la existencia de dichas especies. Con ello, consecuentemente, se evita la pérdida de valores de la biodiversidad asociada al área de interés (Carrascal y Palomino, 2006).

El algoritmo Core-Area Zonation (CAZ) en Zonation prioriza la rareza, minimizando la menor pérdida biológica, ya que da una mayor importancia a la selección de aquellos píxeles que contengan ocurrencias especies raras, y elimina los píxeles que menos se necesitan para retener ocurrencias de cada especie (Moilanen *et al.*, 2005; Lehtomäki y Moilanen, 2013; Lentini y Wintle, 2015). En este sentido, los últimos píxeles que se eliminan son aquellos que tienen una mayor presencia de especies de alta prioridad (alto peso) (Moilanen *et al.*, 2005). Una vez que se completa el proceso, cada celda del paisaje se clasifica y asigna un valor que oscilará entre ‘0’ (las áreas de baja prioridad) y ‘1’

(áreas de alta prioridad) (Moilanen *et al.*, 2014). La eliminación de píxeles se realiza calculando un índice de eliminación  $\delta_i$  (pérdida marginal mínima de valor biológico) para cada una de los píxeles mediante la fórmula:

$$\delta = \max_j \frac{q_{ij} w_j}{c_i}$$

, donde  $w_j$  es el peso o prioridad de las especies  $j$ ,  $c_i$  representa el costo de agregar el píxel  $i$  a la red de áreas de conservación,  $q_{ij}$  es la proporción de la distribución restante de la característica  $j$  ubicada en la celda  $i$  para un conjunto dado de sitios. Cuando se ejecuta el análisis, el programa recorre todas las celdas y calcula un valor  $\delta_i$  basado en la característica que tiene la mayor proporción ponderada de distribución restante en la celda específica, en otras palabras, representa el valor biológico más alto que se perderá si se extrae la celda. Finalmente, el píxel que tenga el valor  $\delta_i$  más bajo será eliminado (Moilanen *et al.*, 2014).

### 2.3. Coeficiente de correlación $r$ de Pearson

El coeficiente de correlación ' $r$ ' de Pearson es un índice que mide el grado de covariación entre distintas variables relacionadas linealmente (Dormann *et al.*, 2012; Restrepo y González, 2007). Los valores absolutos de este coeficiente oscilan entre '-1' y '1', donde '1' es una relación perfecta positiva, es decir, la relación entre dos variables ( $x$  e  $y$ ) es funcionalmente exacta, ya que en la medida que aumenta una de ellas aumenta la otra; mientras que el valor '-1' es una relación perfecta negativa, la cual indica que en la medida que aumenta una variable disminuye la otra (Restrepo y González, 2007). Por último, el valor '0' indica que no hay relación entre las variables (Restrepo y González, 2007). El coeficiente  $r$  está dado por la fórmula:

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{(n \sum x^2 - (\sum x)^2)(n \sum y^2 - (\sum y)^2)}}$$

, donde  $x$  representa a los elementos de la primera variable de datos,  $y$  representa a los elementos de la segunda variable de datos,  $n$  es el número total de datos,  $(\sum x)$   $(\sum y)$  es la suma de todos los valores de la primera variable por la suma de todos los valores de la

segunda variable y  $\sum x^2$  es la suma de todos los valores al cuadrado de la primera variable, análogamente para  $\sum y^2$  (R Core Team, 2017). Para este caso se consideró que si dos mapas de subrogados tienen un coeficiente de correlación  $r$  alrededor de 0.7 ( $r > 0.7$ ), podrían representar patrones similares (Dormann *et al.*, 2012).

#### 4. Estudios previos en la evaluación de subrogados

Albuquerque y Beier (2015, 2016) realizaron un estudio de dos grupos taxonómicos, (plantas y aves), donde seleccionaron siete conjuntos de datos de plantas y cuatro de aves, e identificaron sitios prioritarios de conservación mediante el software Zonation, (implementando el algoritmo Core-Area) y lo compararon con el método de riqueza rareza-ponderada (*rarity-weighted richness*, o RWR en inglés), con la finalidad de evaluar cuál método resulta más eficiente en la identificación de sitios de conservación que represente el mayor número de especies de los grupos taxonómicos. El resultado obtenido mostró que ambos enfoques representan el mismo número de especies en los sitios que priorizan, pero Zonation a diferencia de RWR, identifica el menor número de sitios que represente a todas las especies (Albuquerque y Beier, 2015).

Otros investigadores, como por ejemplo Beger y colaboradores (2007), han identificado sitios de conservación de arrecifes de coral examinando 167 sitios en el Indo-Pacífico, utilizando como subrogados modelos de distribución de tres grupos (peces, moluscos y corales) que se distribuyen en dichas áreas. Primero probaron patrones de congruencia cruzada de taxones para predecir los patrones de subrogación, determinando la congruencia mediante una prueba de correlación  $r$  de Pearson, cuyo resultado fue una correlación mayores a 0.7 entre los peces y los corales y corales y moluscos, pero no entre los moluscos y peces. Además, mediante el algoritmo WORLDMAP, priorizaron sitios de conservación. Finalmente, mediante la prueba de correlación  $r$  de Pearson evaluaron que tan bien representado estaba cada sitio de conservación de los tres grupos, obteniendo como resultado que en más del 24% de moluscos y 14% de peces no son incluidos en los sistemas de reserva seleccionados. Por tal motivo aunque ninguno de los grupos taxonómicos que examinaron fue un subrogado confiable de todos los demás grupos, concluyeron que solo

un taxón está representando eficientemente en un sistema de áreas de conservación (Beger *et al.*, 2007).

Además, Lentini y Wintle (2015), han identificado sitios de conservación en un área agrícola fragmentada en el sudeste Australia utilizando modelos de distribución de especies de tres grupos (aves [n= 81], murciélagos [n = 13] y abejas [n= 36]). Utilizaron el programa Zonation con el algoritmo Core-Area Zonation, para identificar áreas priorizadas para cada grupo, y para evaluar a los subrogados, utilizaron el 30% de las celdas mejor clasificadas en las soluciones para cada uno de los escenarios de priorización, posteriormente calcularon la proporción de la probabilidad de cada modelo de distribución de cada especie (de cada grupo) que se presentan en las celdas mejor clasificadas. Concluyeron que los murciélagos y las aves formaron subrogados moderadamente buenos entre sí, pero no con las abejas. Por considerando que su objetivo era lograr proteger a los tres grupos (ya que todos juegan un papel importante para la agricultura de esa región), no determinaron a alguno como un buen subrogado.

En 2011, Urquiza-Haas y colaboradores, desarrollaron un estudio a fin de comparar si las prioridades identificadas —con el mismo método— para un grupo de organismos (anfibios [n= 208], reptiles [n= 424], aves [n= 273] y mamíferos [n= 241]) son, en términos generales, adecuadas para representar y cubrir las metas de conservación asignadas a otros taxones en México. Sus resultados muestran que existe una correlación espacial (estadísticamente significativa en todos los casos) entre las riqueza de especies de cada grupo, siendo el coeficiente de correlación más bajo el presentando entre aves y reptiles ( $r= 0.69$ ). Además, si bien cualquiera de los grupos utilizados logra representar más de la mitad de las especies de los otros taxones, ninguno logra cubrir la totalidad de las especies, ninguno logra cubrir la totalidad de las especies examinadas dentro de las soluciones de priorización obtenidas. De hecho, se observó que los reptiles y anfibios son muy buenos subrogados de la biodiversidad de vertebrados terrestres pues logran representar altos porcentajes de los otros grupos (80 y 86%, respectivamente), mientras que las aves y mamíferos —a pesar de que sus áreas prioritarias abarcan un área de extensión mayor— fueron menos eficientes en la representación de los otros taxones (60.9% y 73.8%, respectivamente). Curiosamente, solo se observó un 33.4% de congruencia espacial de al menos dos resultados entre la suma de las soluciones de cada grupo.

Es claro que la elección de subrogados es un paso vital en la planeación sistemática de conservación en una región pero como muestran en general estos resultados, esta elección para nada es trivial ya que las características que se analizan determinan en gran medida la efectividad para representar a especies de otros grupos taxonómicos que se han incluido en el análisis (Rodríguez & Brooks, 2007; Drummond *et al.*, 2010). Esto muestra que los posibles subrogados varían dependiendo la zona y los diversos grupos taxonómicos. Por ello no parece posible hacer una generalización debido a que no todas tienen las mismas características, ni presentan las mismas especies y, en consecuencia, no tienen la misma urgencia de protección (Moritz *et al.*, 2001; Moore *et al.*, 2003; Lamoreux *et al.*, 2006; Urquiza-Haas *et al.*, 2011).

##### 5. Características bióticas y abióticas de la Faja Volcánica Transmexicana

El reconocimiento de rasgos comunes (geomorfológicos, evidencias geológicas, tectónicas y climáticas, así como de endemismos de especies) de ciertas extensiones de áreas que las difieren de otras regiones, han propiciado la regionalización del territorio mexicano en provincias (Morrone, 2001b; Torres-Miranda y Luna-Vega, 2006). Dentro de estas, la Faja Volcánica Transmexicana (FVT; Figura 1), cuyos orígenes datan desde el Mioceno Superior (Ferrari, 2000), se localiza en la Zona de Transición Mexicana donde convergen las regiones Neártica y Neotropical (Morrone, 2005; Suárez-Mota y Téllez-Valdés, 2014), siendo el arco volcánico que se desarrolla en la Placa Nortemérica, la Placa Rivera y la Placa de Cocos.

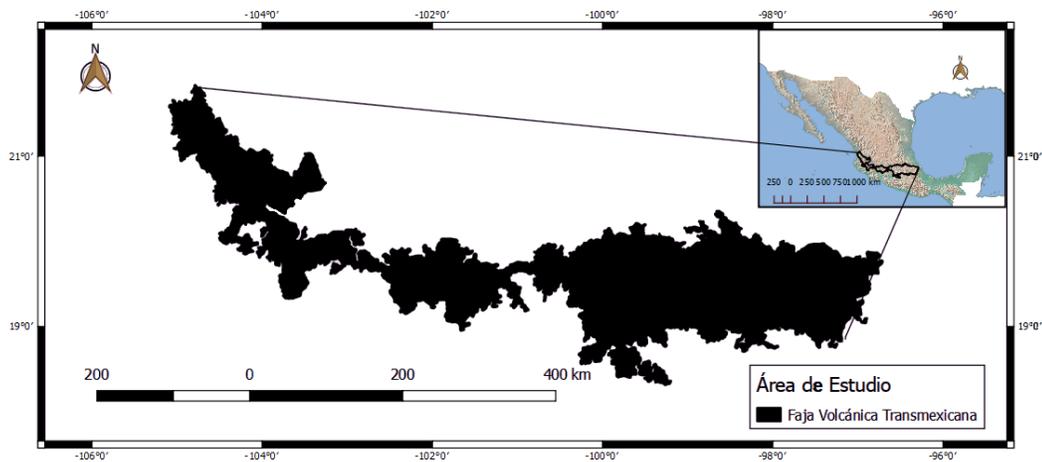


Figura 1. Ubicación de la Faja Volcánica Transmexicana.

Específicamente, la FVT se encuentra localizada en el centro de México (entre los 19 y 21° de latitud norte); extendiéndose desde las costas del Pacífico (San Blas, Nariit y Bahía de Banderas, Jalisco) hasta las costas del Golfo de México (Palma Sola, Veracruz) entre los 1500 y 2500 m.s.n.m (Torres-Miranda y Luna-Vega, 2006; Gamez *et al.*, 2012; Suárez-Mota y Téllez-Valdés, 2014). En la FVT se encuentran las montañas de mayor altura del país: Pico de Orizaba, Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Nevado de Toluca, Malinche, Nevado de Colima, Cofre de Perote, Volcán de Fuego de Colima y Tancítaro, entre otras (Suárez, 2012; Barrera-Moreno *et al.*, 2011; Yarza de la Torre, 1992).

Debido a su topografía, la FVT presenta una alta variabilidad climática, siendo posible encontrar, de acuerdo con el sistema de Köppen (Hernández y Carrasco, 2007; Suárez-Mota, *et al.*, 2014), alrededor de 30 tipos climáticos reconocidos para México. Sin embargo, por lo general, el clima se caracteriza por tener su máxima precipitación en el verano, y con temperaturas entre 12°C a 18°C (Hernández y Carrasco, 2007; Suárez, 2012). Por otra parte, el vegetación de la FVT es muy diversa, pero predominan los bosques de pino-encino y zacatonales (Escalante *et al.*, 2007; Espinosa *et al.*, 2008). Esta provincia es una zona de alta diversidad y endemismos de especies por ejemplo:

<b>Mamíferos</b>	<i>Cratogeomys gymnurus</i> , <i>C. merriami</i> , <i>C. tylosinus</i> , <i>C. zinseri</i> , <i>Cryptotis goldmani</i> , <i>Neotoma nelsoni</i> , <i>Neotomodon alstoni</i> , <i>Orthogeomys lanius</i> , <i>Pappogeomys alcorni</i> , <i>P. bulleri</i> , <i>Peromyscus aztecus hylocetes</i> , <i>P. leucopus</i> , <i>P. mekisturus</i> , <i>Reithrodontomys chrysopsis</i> , <i>R. hirsutus</i> , <i>Romerolagus diazi</i> , <i>Spermophilus mexicanus</i> , <i>S. perotensis</i> , <i>Sorex vagrans orizabae</i> , <i>Sylvilagus floridanus aztecus</i> y <i>Zygoeomys trichopus</i> (Escalante, <i>et al.</i> , 2005; Escalante <i>et al.</i> , 2007; Espinosa <i>et al.</i> , 2008; Gámez <i>et al.</i> , 2012).
<b>Anfibios</b>	<i>Eleutherodactylus angustidigitum</i> , <i>Rhinella marina</i> , <i>Incilius valliceps</i> , <i>Ecnomiophyla miotympanum</i> , <i>Ambystoma altamirani</i> , <i>A. granulatum</i> , <i>A. mexicanum</i> , <i>A. rivulare</i> , <i>A. velasci</i> , <i>Lithobates berlandieri</i> , <i>L. megapoda</i> , <i>L. montezumae</i> , <i>neovolcanica</i> , <i>L. spectabilis</i> (Espinosa <i>et al.</i> , 2008; Flores-Villela <i>et al.</i> , 2010; Vite-Silva <i>et al.</i> , 2010).
<b>Reptiles</b>	<i>Crotalus polystictus</i> , <i>Phrynosoma oriculare cortezi</i> , <i>Sceloporus dugesi intermedius</i> , <i>S. scalaris scalaris</i> , <i>S. parvus</i> , <i>S. spinosus</i> , <i>S. torquatus</i> , <i>Peromyscus</i>

	<i>gratus gratus</i> , <i>P.melanophrys zamorae</i> , <i>Gerrhonotus inferlis</i> , <i>S. minor</i> , <i>Crotalus atrox</i> (Espinosa <i>et al.</i> , 2008; Vite-Silva <i>et al.</i> , 2010).
<b>Aves</b>	<i>Lampornis amethystinus brevirostris</i> , <i>Campylorhynchus megalopterus nelsoni</i> , <i>Geothlypis speciosa</i> , <i>Falco mexicanus</i> , <i>Nomonyx dominicus</i> , <i>Charadrius melodus</i> , <i>Vireo atricapillus</i> , <i>Campylorhynchus megalopterus</i> , <i>Xsenospiza baileyi</i> , <i>Grallaria guatemalensis</i> , <i>Quiscalus palustris</i> (Espinosa <i>et al.</i> , 2008; Navarro-Sigüenza <i>et al.</i> , 2007).
<b>Plantas</b>	<i>Cheilanthes decomposita</i> , <i>Elaphoglossum rufescens</i> , <i>Mammillaria backergiana</i> , <i>M. discolor</i> , <i>M. fittkai</i> , <i>M. knippeliana</i> , <i>M. meyranii</i> , <i>M. nunezii</i> , <i>M. pringlei</i> , <i>M rhodantha</i> , <i>M. scrippsiana</i> , <i>M. spinosissima</i> , <i>M. wiesingeri</i> , <i>Pinus ayacahuite var. Veitchii</i> . <i>P. pseudostrobus fo. Protuberans</i> , <i>Agave inaequidens</i> , <i>A. horrida</i> , <i>Quercus acutifolia</i> (Espinosa <i>et al.</i> , 2008; Hernández y Gómez-Hinostrosa, 2011, 2015).
<b>Insectos</b>	<i>Odontotaeninus cuspidatus</i> , <i>Golofa globulicornis</i> , <i>Onthophagus hipopotamus</i> , <i>Culicoides albomaculata</i> , <i>C. bakeri</i> , <i>C. dampfi</i> , <i>Mydas oaxacensis</i> , <i>Polybia simillina</i> (Morrone, 2001).

## Justificación

Debido a sus características geomorfológicas y biológicas, la Faja Volcánica Transmexicana es una de las provincias del país más estudiadas por geógrafos, biólogos y urbanistas. En ella se encuentran algunas de las ciudades más importantes de México (incluyendo la capital), en donde habitan la mayor parte de la población del país, y también se encuentra una gran actividad económica (Suarez, 2012; Suárez-Mota y Téllez-Valdés, 2014). Por ende, uno de los principales problemas ambientales que presenta la FVT es el crecimiento de la mancha urbana, causada por el surgimiento desordenado de los asentamientos humanos irregulares y autorizados, que en conjunto facilitan el crecimiento de demandas de servicios urbanos difíciles de proveer por las autoridades (Suárez, 2012).

Como consecuencia de todos estos escenarios, se genera una creciente presión sobre los recursos naturales. Por ejemplo, la utilización inadecuada y/o la perturbación de la vegetación forestal (Torres-Miranda y Luna, 2006), pues como se ha reportado en estudios previos la cobertura vegetal de la FVT se ha reducido en las últimas décadas hasta en un 64.2% (Suárez, 2012). De hecho actualmente se observa que solo existe, una cobertura vegetal de 58,274 km<sup>2</sup>, mientras que 104,740.8 km<sup>2</sup> han sido ocupados para establecer zonas urbanas, agrícolas, ganaderas e industriales (Suárez, 2012); lo cual además de provocar conjuntamente el decrecimiento de aguas superficiales, el incremento en la erosión de suelo (Cedillo *et al.*, 2007), ocasiona la pérdida del área de distribución de las especies, tanto de esta región como la de todo el país (Escalante *et al.*, 2007; Suárez, 2012).

Se ha documentado que un elevado número de especies (entre 10 y 50%) de los grupos taxonómicos de mamíferos, anfibios, aves, coníferas, se encuentran en peligro de extinción (Urquiza-Haas *et al.*, 2011). Si esto sigue así, las especies que sólo se encuentran en la FVT pueden llegar a extinguirse. Por lo tanto, para minimizar la pérdida de la biodiversidad es fundamental identificar y evaluar sitios priorizados para la conservación para proponer áreas protegidas efectivas que ayuden a la conservación de estos grupos taxonómicos.

La planeación sistemática de la conservación es un enfoque que propone una serie de redes o sistemas de áreas de conservación, siguiendo una serie de pasos que son

dispensables para la identificación de dichas áreas. Uno de los elementos clave de la planeación sistemática de la conservación es la identificación de los subrogados o indicadores de la biodiversidad de dicha región de interés y las metas de conservación, pues de estos elementos depende su eficacia (Margules y Sarkar, 2009; Urquiza-Haas *et al.*, 2011; 2019). Los subrogados se utilizan debido a que la biodiversidad es un concepto complejo e imposible de estimar o cuantificar en su totalidad (Margules y Pressey, 2000; Margules y Sarkar, 2009; Urquiza-Haas *et al.*, 2011). Es por ello que la presente investigación está enfocada a la evaluación de cinco grupos taxonómicos (anfibios, aves, insectos, mamíferos y plantas) que presentan especies con una distribución restringida a la FVT, para ser empleados como subrogados de sitios de conservación en la Faja Volcánica Transmexicana.

## Objetivos

### *Objetivo general*

Evaluar el grado de efectividad en términos de representatividad de diferentes grupos taxonómicos (anfibios, aves, insectos, mamíferos y plantas) para ser utilizados como subrogados de la biodiversidad para la identificación de sitios prioritarios de conservación en la Faja Volcánica Transmexicana.

### *Objetivos particulares*

1. Caracterizar los patrones espaciales de riqueza de especies de los grupos taxonómicos de anfibios, aves, insectos, mamíferos y plantas endémicos a la Faja Volcánica Transmexicana.
2. Evaluar, mediante un análisis *a priori* de congruencia cruzada de taxones, la correlación espacial entre los patrones espaciales de riqueza de especies de diferentes grupos taxonómicos, por separado (anfibios, aves, insectos, mamíferos y plantas) y agrupados (invertebrados, plantas y vertebrados).
3. Realizar un análisis de priorización de áreas mediante el programa Zonation, para identificar sitios prioritarios de conservación en la Faja Volcánica Transmexicana utilizando diferentes grupos taxonómicos, por separado (anfibios, aves, insectos, mamíferos y plantas) y agrupados (invertebrados, plantas y vertebrados).
4. Comparar, mediante un análisis *a posteriori* de congruencia cruzada de áreas prioritarias de conservación para los taxones, el grado de efectividad —en términos de representatividad de especies— de diferentes grupos taxonómicos como subrogados de la diversidad biológica de la Faja Volcánica Transmexicana.
5. Evaluar los grados de congruencia espacial y valores de representación de especies obtenidos de los resultados de cada grupo y combinación realizada, para la definición de los mejores subrogados utilizar en estudios de conservación en la FVT.

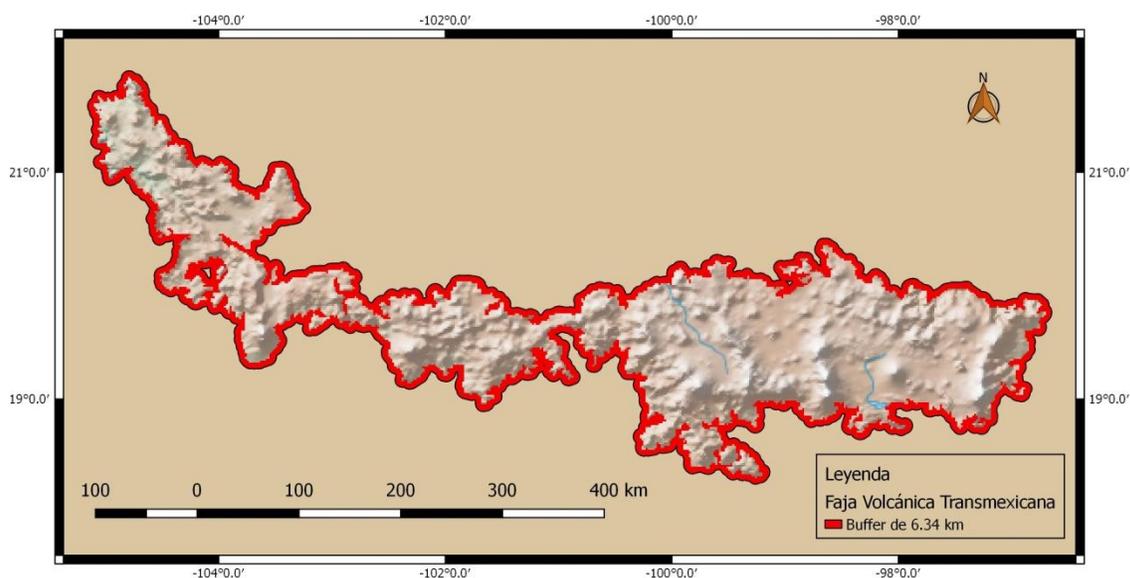
## Hipótesis

Usando sólo especies endémicas de cinco grupos taxonómicos de la Faja Volcánica Transmexicana que comparten los mismos requerimientos espaciales y ambientales, los grupos taxonómicos tendrán altas correlación positivas ( $r = 0.7$ ) tanto para las pruebas *a priori* como *a posteriori*, por lo cual uno o más de los grupos taxonómicos aquí analizados puede(n) ser considerado(s) como buen(nos) subrogado(s) para una buena (>50%) representación de la biodiversidad de la Faja Volcánica Transmexicana, y la definición de áreas prioritarias de conservación para promover estrategias efectivas de protección.

## Método

### 1. Área de Estudio

Para definir el área de estudio (*Figura 2*) se eligió como mapa base la propuesta de la Faja Volcánica Transmexicana de Morrone *et al.* (2017), la cual está basada en las ecorregiones reconocidas para el país. Adicionalmente, a este polígono se le agregó un *buffer* de 6.34 km (equivalente a la distancia latitudinal más estrecha del polígono) con la finalidad de tener un perímetro del área más amplio y así obtener un mejor margen de la distribución de especies restringida a la FVT.



*Figura 2. Faja Volcánica Transmexicana (Morrone 2017).*

### 2. Recopilación de datos

Con las bases de datos proporcionadas por cada especialista de cada grupo taxonómico se elaboró una lista de las especies endémicas de la FVT, de la cual se obtuvieron 3,476 puntos de ocurrencia (90.3% dentro del polígono de la FVT) para 167 especies (*Cuadro 1*). Para este estudio, sólo se consideró como especies endémicas a aquellas especies con más de 50% de sus puntos de colecta dentro de la FVT (incluido el *buffer*). La información para la obtención de esta lista de especies fue compilada de la literatura especializada para cada

grupo taxonómico: anfibios (Ochoa-Ochoa y Flores-Villela, 2017), aves (Navarro-Sigüenza *et al.*, 2003; Peterson *et al.*, 2016), insectos (Reyes-Castillos y Morón-Ríos, 2005; Conabio, 2017) mamíferos (Escalante, 2015) y plantas (Escalante, 2015; Hernández y Gómez-Hinostrosa, 2011, 2015; Téllez-Valdés, 2017). Para cada caso, de ser necesario, se realizaron las respectivas actualizaciones de nomenclatura, así como una revisión detallada de los sesgos espaciales y los errores en las coordenadas de georreferencias espacial de las localidades, discutidas y revisadas con los especialistas de cada grupo taxonómico. De hecho, para evitar problemas con el sesgo de muestreo se filtraron los puntos a una distancia de 10 km<sup>2</sup> como sugieren Anderson y Raza (2010) y Boria *et al.* (2014), a las especies con seis puntos o más, mediante el paquete sphin en R 3.4.2 (Aiello-Lammens *et al.*, 2015; R Core Team, 2017).

*Cuadro 1. Número de datos obtenidos por cada grupo taxonómico.*

<b>Grupo Taxonómico</b>	<b>Especies</b>	<b>Número de registros totales</b>	<b>Registros dentro de la FVT</b>	<b>Número de puntos totales</b>	<b>Puntos dentro de la FVT</b>
<i>Anfibios</i>	25	5078	4834	570	522
<i>Aves</i>	1	63	63	18	18
<i>Insectos</i>	89	3099	3063	646	624
<i>Mamíferos</i>	15	3105	2917	1208	1102
<i>Plantas</i>	37	1250	1065	1034	873
<b>Total</b>	<b>167</b>	<b>12595</b>	<b>11942</b>	<b>3476</b>	<b>3139</b>

### *3. Modelación de la distribución geográfica de las especies*

El modelo BAM propuesto por Soberón (2010), se utiliza para describir las interacciones de los factores determinantes en las distribuciones de las especies tales como: factores ambientales (denotado en el modelo como ‘A’); bióticos, (denotado en el modelo por ‘B’) y el área de movilidad (denotado como ‘M’). En particular, definir el área de movilidad ‘M’

consiste el área donde se han encontrado a las especies por un periodo de tiempo considerable (Soberón, 2010). En este caso, para las especies con más de seis puntos, se delimitó la M de la siguiente manera: primero se midió la distancia entre cada punto por especie mediante la herramienta de matriz de QGIS 2.18.4. (Quantum GIS Development Team 2017). Para este proceso se seleccionó el promedio de todas las distancias que se obtuvieron entre cada punto de cada especie para realizar un *buffer* que delimitara un perímetro que cubre a los puntos, para no generar un *buffer* que excediera el área donde posiblemente se distribuye la especie. El *buffer* se realizó en QGIS 2.18.4., mediante la herramienta *buffer* (Quantum GIS Development Team 2017). Finalmente, utilizando el *buffer* se elaboró un polígono conexo mínimo mediante la herramienta de envoltura convexa para crea una capa más homogénea para definir la M de cada especie.

Posteriormente, se realizó un análisis de factor de inflación de varianza (VIF), mediante R 3.4.2 (R Core Team, 2017) utilizando el paquete HH (Richard, 2016) para identificar la multicolinealidad de 19 variables bioclimáticas de México (Cuervo-Robayo *et al.*, 2013) y tres variables topográficas (pendiente, altitud y aspecto); todas con una resolución espacial de 30 segundos-arco (~1 km). Las variables no correlacionadas se utilizaron para modelar en Maxent 3.4.0 (Phillips *et al.*, 2017). Maxent se ejecutó utilizando el paquete dismo (Hjmans *et al.*, 2017) en R 3.4.2 (R Core Team, 2017) y considerando el área M definida para cada especie a fin de limitar la extensión de las variables. Finalmente, para modelar la distribución potencial se separaron las especies en tres grupos que cumplieran con lo siguiente (también véase el Anexo 1):

(1) Para las especies con 25 o más puntos, los puntos fueron aleatoriamente divididos en 75% de entrenamiento y 25% para evaluar el poder predictivo del modelo. Se utilizó el procedimiento de selección de modelo para ajustar el parámetro de regulación (multiplicador  $\beta$ ) y la selección de características con el fin de reducir la complejidad de los modelos. Estos modelos se realizaron en R 3.4.2 (R Core Team, 2017) mediante el paquete EMNeval (Muscarella *et al.*, 2014).

(2) Para especies que presentan de seis a 24 puntos, se empleó el procedimiento Jacknife n-1 de Pearson *et al.* (2007), para esto se realizaron múltiples predicciones por

especie y posteriormente se evaluó el desempeño del modelo para predecir la localidad excluida bajo una significación estadística (Pearson *et al.*, 2007).

(3) Las especies con cinco o menos puntos no fueron modeladas. Sin embargo, por su alta relevancia en términos de conservación, dada a su rareza en los patrones de distribución geográfica, Los puntos de cada especie fueron rasterizados delimitando su perímetro de extensión a un *buffer* de 2 km.

Para cada una de las 70 especies con más de seis datos independientes de ocurrencia, los modelos se elaboraron con 10 réplicas a partir de los cuales se midió el desempeño de éstos respecto al área bajo la curva (*AUC*) de la gráfica de la característica operativa del receptor (*ROC*) (Peterson *et al.*, 2008). Los modelos se evaluaron a partir de la curva *ROC* parcial, para seleccionar los mejores a partir de las 10 réplicas. Se obtuvieron modelos donde los puntos cayeran en las áreas predichas y fueran diferentes a una distribución al azar (donde el valor de  $AUC=0.5$  y  $p>0$ ) para seleccionar al mejor modelo. Estas pruebas se realizaron mediante las herramientas en línea disponibles en Niche ToolBox (Osorio-Olvera *et al.*, 2018). Para eliminar la sobrepredicción de los modelos y transformarlos en binarios, se utilizó el umbral flexible (Equal Training Sensitivity and Specificity), ya que el umbral de omisión  $E = 10$  representa el 10 % de los registros que pueden causar problemas estadísticos y es útil para reducir el error aceptable en el modelo (Peterson *et al.*, 2008).

#### 4. Identificación y evaluación de subrogados

Tal como se indica en la Figura 3, para este estudio se realizaron dos tipos de pruebas (una *a priori* y una *a posteriori*) a fin de evaluar los valores de representatividad y congruencia espacial de los subrogados analizados para la caracterización y protección de la diversidad biológica de la Faja Volcánica Transmexicana.

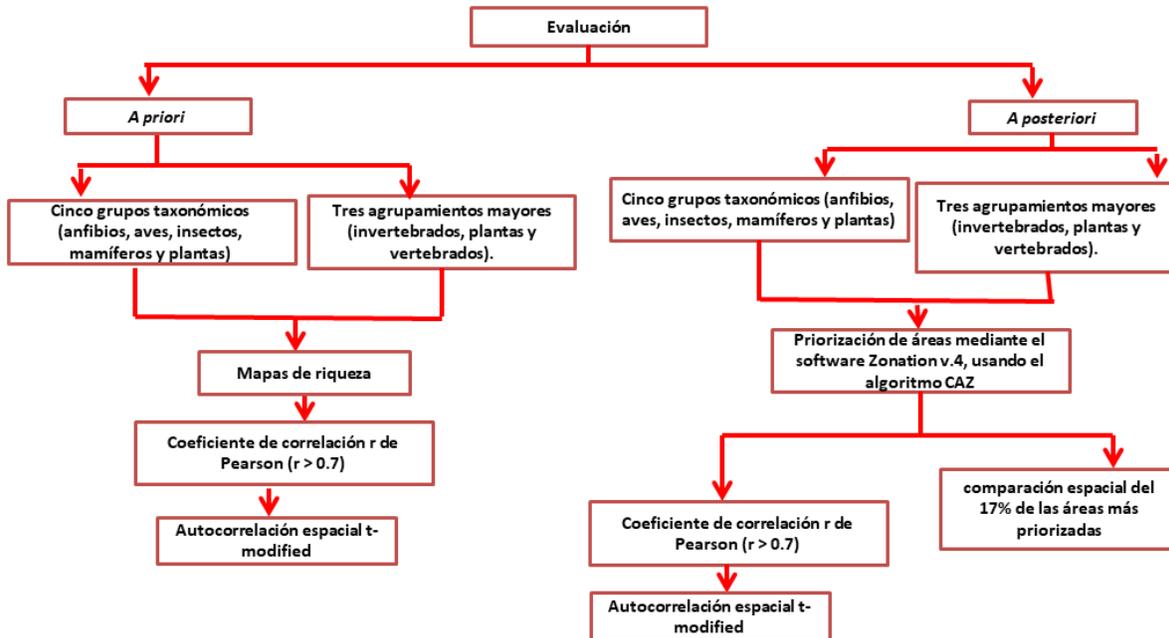


Figura 3. Esquema de método para la evaluación de los subgrupos

#### 4.1 Prueba a priori

Empleando la librería “raster” del programa R 3.4.2 (R Core Team, 2017), se elaboraron mapas de riqueza de especies, los cuales conjuntan los modelos de distribución geográfica de las especies por cada grupo taxonómico (anfibios, aves, insectos, mamíferos y plantas) y los agrupamientos mayores (de acuerdo a las categorías linneanas más altas: invertebrados, vertebrados y plantas), los cuales fueron considerados individualmente como los casos de “subrogados” a evaluar en términos de representatividad del resto de grupos. Posteriormente, utilizando el programa R 3.4.2 (R Core Team, 2017), se calculó el coeficiente de correlación  $r$  de Pearson entre los patrones espaciales de riqueza de especies entre todos los grupos taxonómicos individuales y los agrupamientos mayores. En este sentido, considerando el principio matemático de las pruebas de correlación esperamos que los diferentes casos de subrogados presenten una correlación positiva mayor o igual a 0.7 (Dormann *et al.*, 2012; Molina-Arias, 2017) como indicativo de la alta correspondencia existente entre los valores de riqueza existente entre los grupos. Además, para ajustar la autocorrelación espacial del valor de p-value se realizó la prueba t modified propuesta por

Dutilleul (1993). La prueba se realizó en R usando el paquete SpatialPack v.0.3 (Venables y Ripley, 2002; Vallejos, *et al.*, 2018).

#### 4.2 Prueba a posteriori

Por otra parte, en el programa Zonation v.4 (Moilanen *et al.*, 2014) se priorizaron áreas para cada grupo taxonómico y para los agrupamientos mayores, empleando el algoritmo *Core-Area Zonation* (CAZ), el cual identifica como áreas de alta prioridad a los pixeles donde se localicen especies raras. Además, que garantiza la pérdida mínima de las distribuciones de las especies (Moilanen *et al.*, 2005; Lehtomäki y Moilanen, 2013), debido a que los últimos pixeles que se eliminan son los que tienen especies de alta prioridad, a los que se les asigna un valor alto (peso alto) (Moilanen *et al.*, 2005). Dado que todas las especies están delimitadas a la FVT, se realizó el análisis asignándole el mismo valor de peso (peso= 1) a todas las especies. Para analizar si existe correspondencia entre los sitios priorizados para cada grupo taxonómico y agrupamiento mayor, se realizó un análisis de correlación de Pearson tal como se realizó en la prueba *a priori* (Beger *et al.*, 2007), utilizando el programa R.3.4.2 (R Core Team, 2017) y el paquete SpatialPack v.0.3 (Venables y Ripley, 2002; Vallejos, *et al.*, 2018).

Finalmente para evaluar los grados de congruencia espacial y valores de representatividad de los grupos taxonómicos se realizó una comparación espacial del 17% de las áreas más priorizadas —en congruencia a las metas de conservación establecidas en el Convenio de Diversidad Biológica (UNEP, 2010) — entre las propuestas de áreas de conservación obtenidas en Zonation para cada grupo taxonómico, tanto por separado como para los agrupamientos mayores. En este sentido, evaluamos la coincidencia de los resultados así como el número de especies promedio reportada para cada grupo taxonómico. Además, se analizaran las curvas de rendimiento de los subrogados generadas por Zonation utilizando el 17% de las áreas más priorizadas.

## Resultados y Discusión

### *1. Patrones de distribución geográfica de la especies*

En total de las 167 especies objeto de estudio, se modelaron efectivamente 43 (~26%), de las cuales: 10 especies (anfibios= 2, mamíferos= 5 y plantas= 3) presentaron 25 o más puntos validados para la obtención de modelos de acuerdo al método de ENMeval aplicado. Un total de 33 especies (anfibios= 6, aves= 1, insectos= 11, mamíferos= 6, y plantas= 9) presentaron de seis a 24 puntos independientes validados mediante el método de Pearson y colaboradores (2007). Para los casos de las 27 especies restantes (anfibios= 9, insectos= 9, mamíferos= 3 y plantas= 6), con más de seis puntos pero cuyos modelos de distribución no tuvieron un buen rendimiento estadístico en cualquiera de los dos enfoques utilizados, las localidades de ocurrencia fueron rasterizadas con un *buffer* de 2 km<sup>2</sup>. Este último procedimiento fue el mismo utilizado para las 97 (~58%) especies con menos de seis localidades independientes que no fueron modeladas (ver Anexo *Cuadro 1* para una descripción detallada de las especies modeladas o no).

### *2. Evaluación de subrogados mediante la prueba a priori*

A continuación, se muestran los patrones de riqueza de los cinco grupos taxonómicos en la Faja Volcánica Transmexicana (*Figura 4*) y de los patrones de riqueza de los tres agrupamientos mayores (*Figura 5*). En los tonos más claros se muestran los sitios con menos especies y los tonos más oscuros los sitios con más especies. En general, se observa que en algunos estados como Puebla, Veracruz, Estado de México y Tlaxcala son las regiones de la FVT que presentan mayores valores de concentración de especies de acuerdo a los patrones de riqueza de los grupos taxonómicos individuales como en los agrupamientos mayores. Este patrón general observado fue concordante con lo reportado por trabajos previos de Luna-Vega *et al.* (2010), Álvarez y Morrone (2004), Escalante *et al.* (2004), los cuales muestran que en estas mismas zonas de la FVT existe una alta riqueza de especies, por lo cual son considerados como alto grado de importancia en términos de conservación (Sánchez-Cordero *et al.*, 2001; 2005).

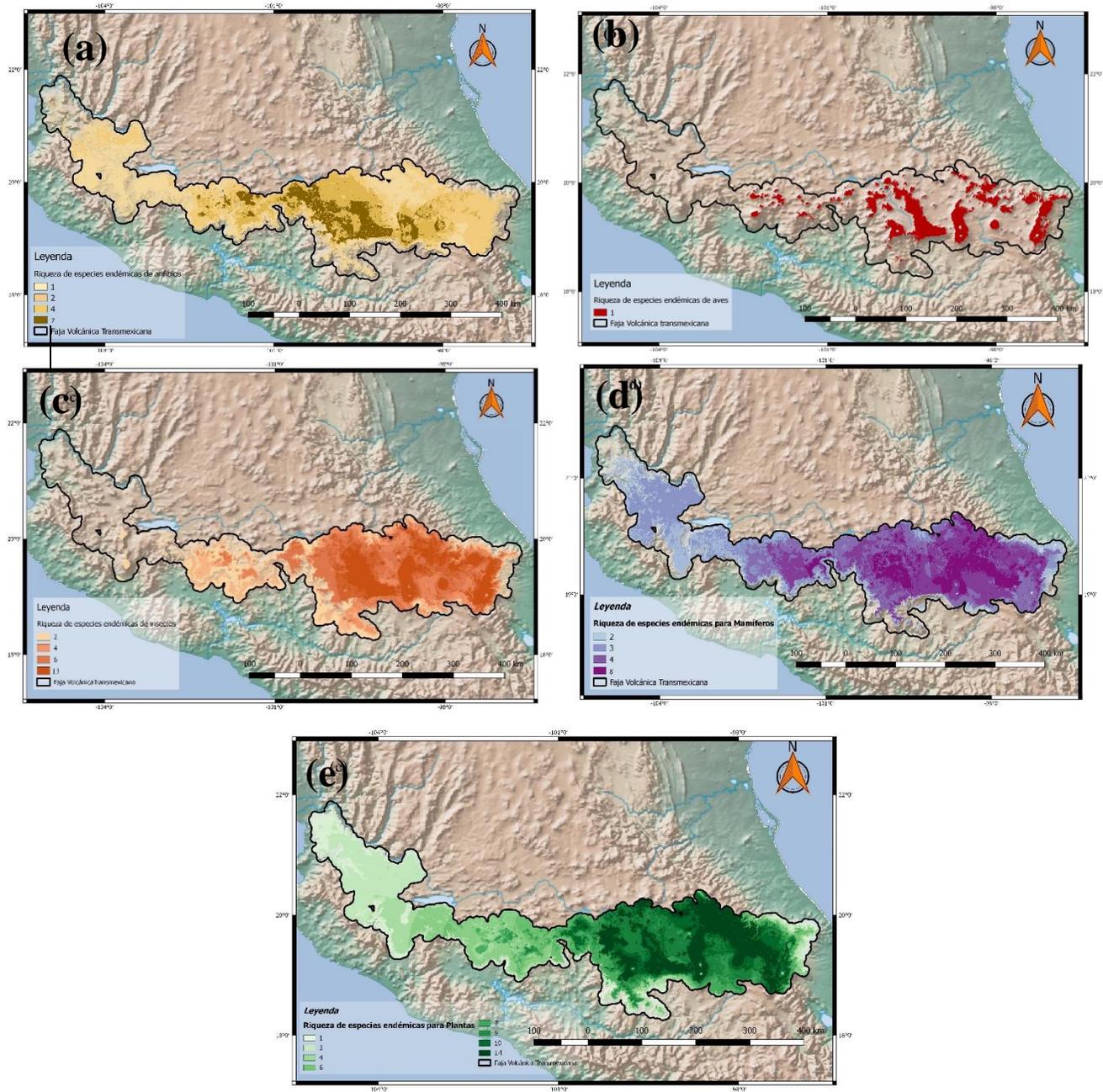


Figura 4. Patrón de riqueza espacial para los grupos individuales de las especies anfibios (a), aves (b), insectos (c), mamíferos (d) y plantas (e) endémicos a la Faja Volcánica Transmexicana.

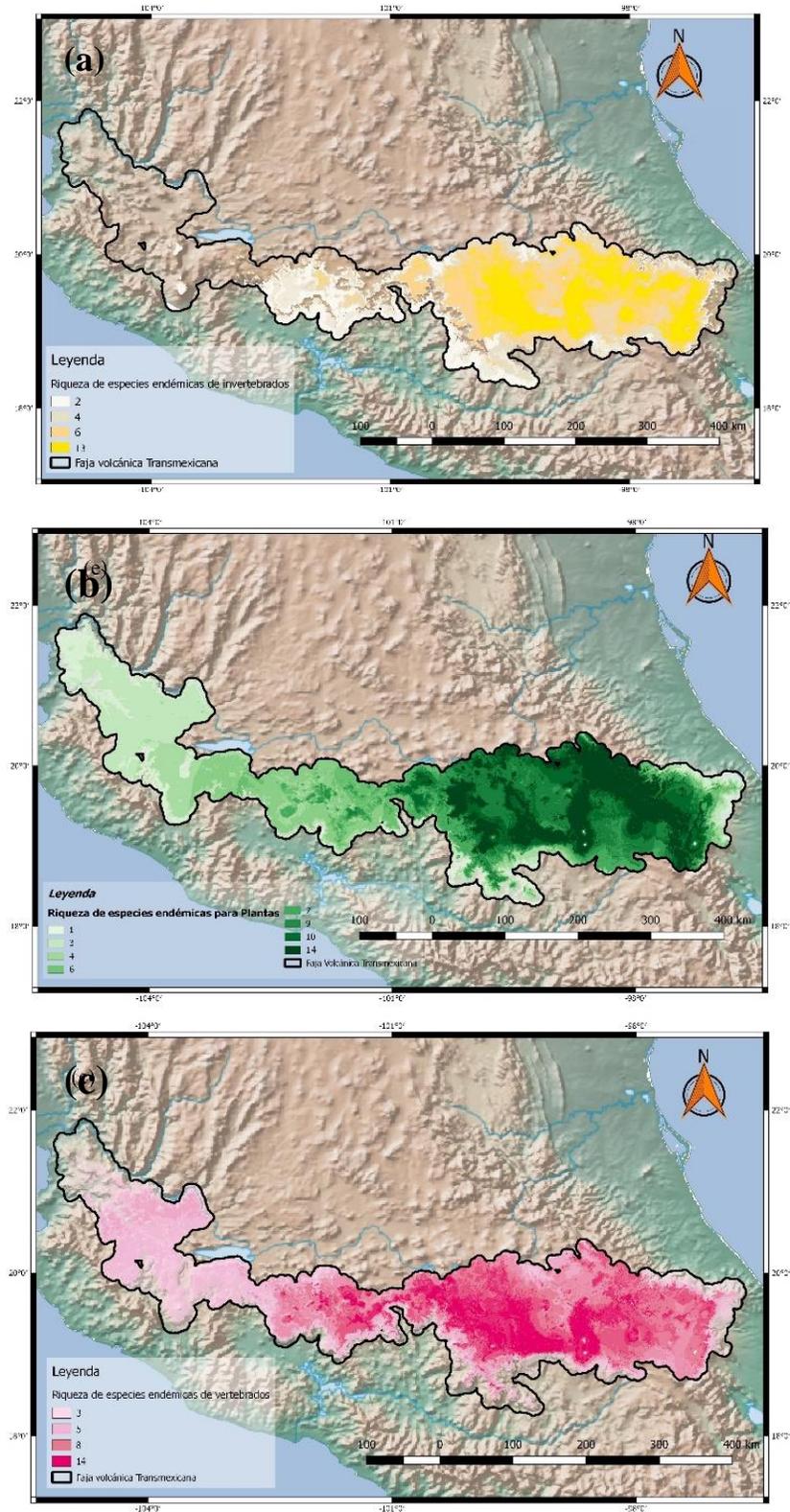


Figura 5. Patrón de riqueza espacial para los agrupamientos mayores de las especies invertebrados (a), plantas (b) y vertebrados (c) endémicos a la Faja Volcánica Transmexicana.

Como se muestra en el *Cuadro 2*, los resultados de la prueba de correlación  $r$  de Pearson para los patrones de riqueza de los cinco grupos taxonómicos mostraron valores positivos y estadísticamente significativos ( $p < 0.001$ ) para las relaciones entre los valores de distribución y concentración espacial de especies endémicas entre taxones. Para el 60% de los casos (*Cuadro 2*) se observaron valores de correlación  $r$  mayores a 0.7, esto demuestra que existe una alta congruencia cruzada entre los patrones de riqueza entre anfibios, insectos, mamíferos y planta, por lo cual –en términos de conservación– al utilizar a cualquiera de estos grupos podrían representarse intrínsecamente los valores asociados a los grupos restantes, y en consecuencia ser considerados como buenos subrogados de la riqueza de especies.

*Cuadro 2. En color negro se muestran los resultados del coeficiente de correlación  $r$  de Pearson para la prueba a priori de congruencia cruzada entre la riqueza de los cinco grupos taxonómicos, mientras que los valores en color rojo corresponden a la prueba autocorrección espacial t-modified. Para ambos casos los valores de significancia estadística ( $p$ ) están mostrados entre paréntesis.*

	<b>Anfibios</b>	<b>Aves</b>	<b>Insectos</b>	<b>Mamíferos</b>	<b>Plantas</b>
<b>Anfibios</b>	–	0.46 ( $< 0.001$ ) 0.37 ( $< 0.001$ )	0.81 ( $< 0.001$ ) 0.59 (0.04)	0.91 ( $< 0.001$ ) 0.68 ( $< 0.001$ )	0.89 ( $< 0.001$ ) 0.63 (0.03)
<b>Aves</b>	–	–	0.57 ( $< 0.001$ ) 0.52 ( $< 0.001$ )	0.42 ( $< 0.001$ ) 0.03 (0.03)	0.48 ( $< 0.001$ ) 0.43 ( $< 0.001$ )
<b>Insectos</b>	–	–	–	0.84 ( $< 0.001$ ) 0.69 (0.07)	0.92 ( $< 0.001$ ) 0.88 (0.06)
<b>Mamíferos</b>	–	–	–	–	0.95 ( $< 0.001$ ) 0.79 (0.03)

Sin embargo, el 80% de los datos obtenidos del análisis de autocorrección espacial presentan correlaciones por debajo del 0.7. Por ejemplo, las plantas y los mamíferos, los cuales presentaron la correlación más alta ( $r = 0.95$ ), demuestran que sus patrones espaciales de riqueza están relacionados con un 95% de coincidencia entre ellos (Anexo 2). Por lo tanto, con base en los resultados de la autocorrelación espacial ( $r = 0.79$ ) sólo los mamíferos y las plantas podrían considerarse entre ellos como subrogados entre ellos pero no de la demás diversidad biológica de la FVT.

Por otro lado, para las comparaciones de los patrones de espaciales de riqueza de especies entre los tres agrupamientos mayores (*Cuadro 3*), se obtuvieron resultados similares a la prueba de los grupos taxonómicos, todas las combinaciones presentaron altos valores de correlación positiva y estadísticamente significativa ( $r > 0.7$ ;  $p < 0.001$ ). Se observó que las plantas fueron el grupo con mayor grado de relación espacial ( $> 0.90$ ) con el resto de los grupos de taxones. El valor más bajo de correlación ( $> 0.86$ ) fue observado entre las especies de vertebrados e invertebrados. Sin embargo en la autocorrelación espacial, todas las correlaciones fueron con un valor de  $r = 1$  y altamente significativa. Por lo tanto entre agrupamientos mayores los patrones de riqueza de la diversidad biológica de la Faja Volcánica Transmexicana coinciden más del 90%, existiendo una congruencia espacial entre los taxones.

*Cuadro 3. En color negro se muestran los resultados del coeficiente de correlación  $r$  de Pearson para la prueba a priori de congruencia cruzada entre la riqueza de los agrupamientos mayores, mientras que los valores en color rojo corresponden a la prueba de autocorrección espacial  $t$ -modified. Para ambos casos los valores de significancia estadística ( $p$ ) están mostrados entre paréntesis.*

	<b>Invertebrados</b>	<b>Vertebrados</b>	<b>Plantas</b>
<b>Invertebrados</b>	–	0.86 ( $< 0.001$ ) <b>1</b> ( $< 0.001$ )	0.92 ( $< 0.001$ ) <b>1</b> ( $< 0.001$ )
<b>Vertebrados</b>	–	–	0.95 ( $< 0.001$ ) <b>1</b> ( $< 0.001$ )

### 3. Evaluación de subrogados mediante la prueba a posteriori

A continuación se muestran los mapas de las áreas priorizadas para la Faja Volcanica Transmexicana obtenidos basados en los cinco grupos taxonómicos por separado y de los tres agrupamientos mayores (*Figuras 6 y 7*). Para todos los casos, en una escala del 0 al 1, los tonos más claros (valores cercanos a cero) corresponden a aquellas áreas consideradas como sitios menos prioritarios –en términos de conservación– mientras que los tonos más oscuros (valores cercanos a uno) indican aquellos considerados como los más importantes.

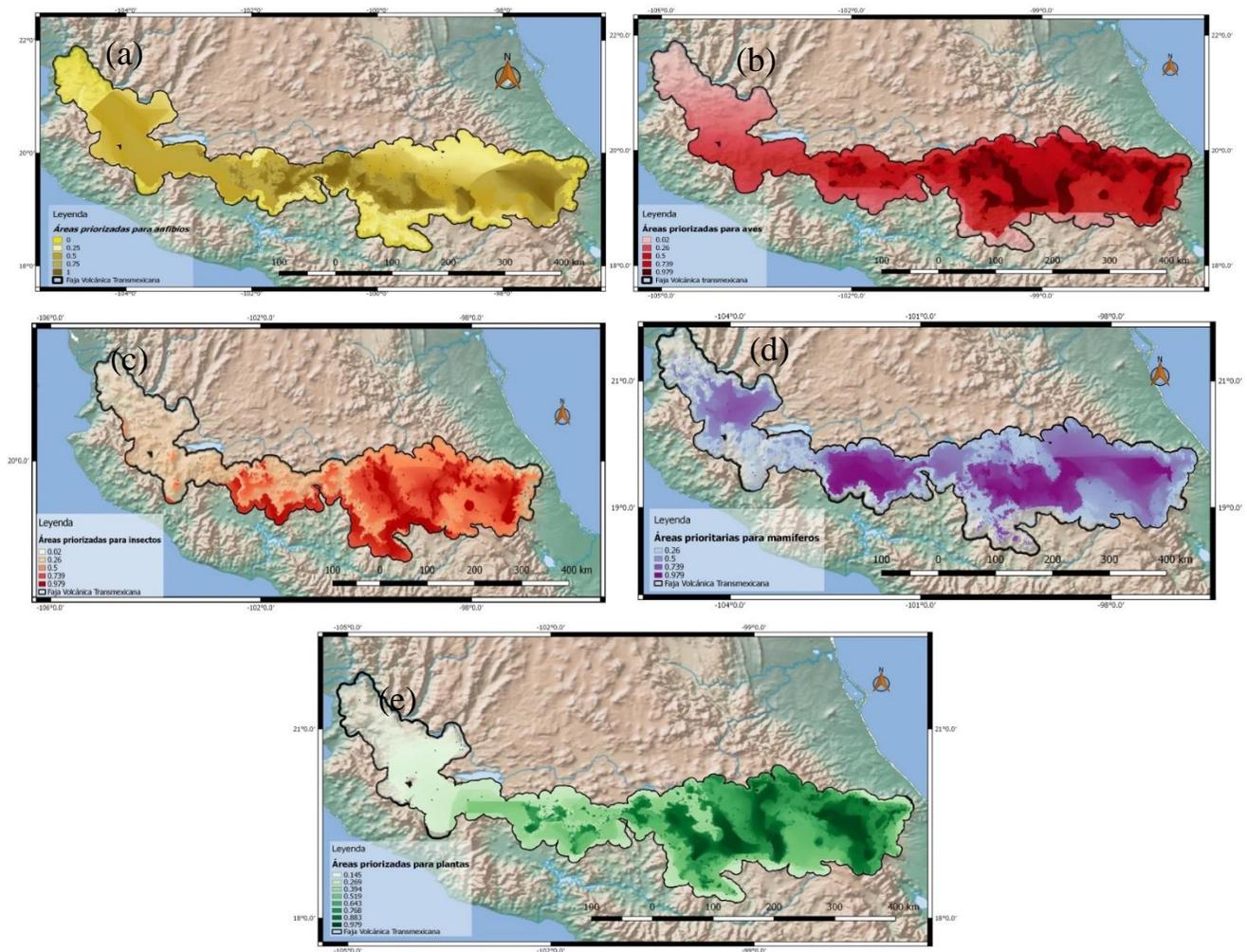


Figura 6. Patrón espacial de priorización de áreas obtenidos por el análisis en el ZONATION (en una escala del 0 al 1) para los grupos individuales de las especies de anfibios (a), aves (b), insectos (c), mamíferos (d) y plantas (e) endémicas a la Faja Volcánica Transmexicana.

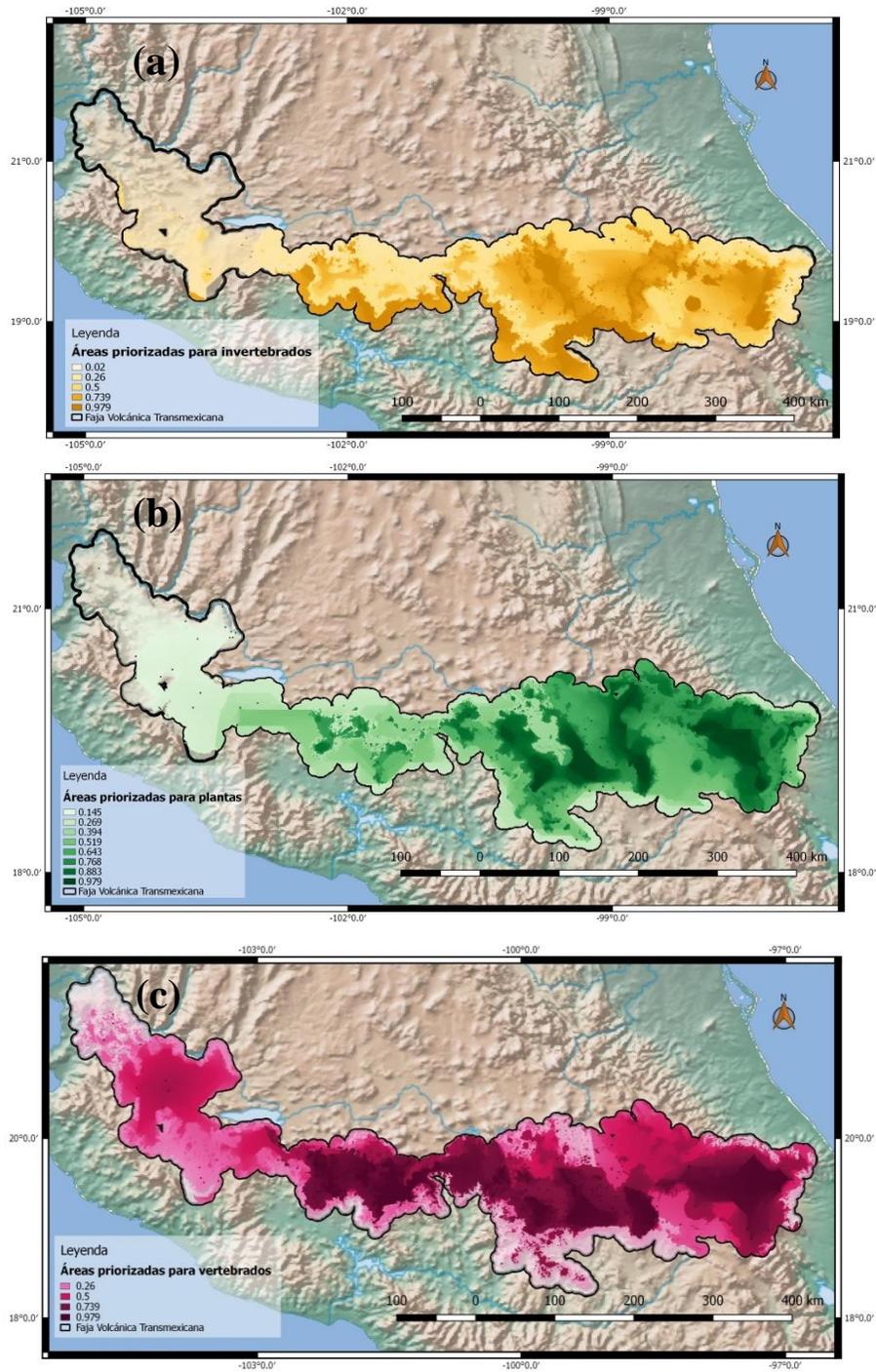


Figura 7 Patrón espacial de priorización de áreas obtenidos por el análisis en el ZONATION (en una escala del 0 al 1) para tres principales grupos analizados endémicos en la Faja Volcánica Transmexicana: invertebrados (a), plantas (b) y vertebrados (c).

Como se muestra en la *Cuadro 4*, los resultados de la prueba de correlación ‘*r*’ de Pearson para los sitios priorizados de los cinco grupos taxonómicos presentan valores positivos  $r < 0.5$ , y estadísticamente significativos ( $p < 0.001$ ), siendo la comparación de los mamíferos con las plantas la correlación más alta ( $r = 0.50$ ) observada. Esto demuestra que existe una correlación moderada entre las áreas priorizadas de los mamíferos y las plantas. La correlación más baja fue entre los sitios que priorizan los anfibios con respecto a los sitios que priorizan los insectos ( $r = 0.01$ ) (Anexo 2). Por otro lado, en los datos del análisis de autocorrelación espacial, presentan los mismos resultados de las correlaciones de Pearson, aunque significativamente diferentes, como en el caso entre los anfibios e insectos ( $p = 0.92$ ) y aves y mamíferos ( $p = 0.24$ ), siendo los resultados de estos dos datos no son certeros. En general, con base a estos resultados se observa que las correlaciones entre los sitios priorizados para cada uno de los grupos analizados en este documento en realidad demuestra una relación baja entre la priorización dada a cada sitio de la FVT.

*Cuadro 4* En color negro se muestran los resultados del coeficiente de correlación *r* de Pearson de los sitios priorizados de los cinco grupos taxonómicos, mientras que los valores en color rojo corresponden a la prueba de autocorrección espacial *t*-modified. Para ambos casos los valores de significancia estadística (*p*) están mostrados entre paréntesis.

	Anfibios	Aves	Insectos	Mamíferos	Plantas
<b>Anfibios</b>	–	0.35 ( $< 0.001$ ) 0.35 (0.02)	0.01 ( $< 0.001$ ) 0.01 (0.92)	0.42 ( $< 0.001$ ) 0.42 (0.001)	0.32 ( $< 0.001$ ) 0.32 (0.001)
<b>Aves</b>	–	–	0.35 ( $< 0.001$ ) 0.35 ( $< 0.001$ )	0.16 ( $< 0.001$ ) 0.16 (0.24)	0.41 ( $< 0.001$ ) 0.41 ( $< 0.001$ )
<b>Insectos</b>	–	–	–	0.20 ( $< 0.001$ ) 0.20 (0.02)	0.29 ( $< 0.001$ ) 0.29 ( $< 0.001$ )
<b>Mamíferos</b>	–	–	–	–	0.50 ( $< 0.001$ ) 0.50 (0.01)

En el caso de los tres grupos taxonómicos mayores, como se muestra en la *Cuadro 5*, los valores de correlación de Pearson son similares a los grupos taxonómicos, por separado, con una  $r < 0.50$  y estadísticamente significativas, siendo la correlación entre los vertebrados y las plantas la relación más alta observada ( $r = 0.55$ ). Además el análisis de autocorrelación espacial mostró tendencias con valores de  $r$  inferiores a 0.7, siendo los invertebrados y plantas la correlación más baja ( $r = 0.10$ ) aunque estadísticamente no significativa ( $p = 0.22$ ). La relación entre vertebrados y plantas presentaron los valores de correlación más altos ( $r = 0.55$ ) y estadísticamente significativos ( $p = < 0.001$ ). Esto demuestra los sitios priorizados de los agrupamientos mayores se representan menos del 50% de sus áreas priorizadas.

*Cuadro 5 En color negro se muestran los resultados del coeficiente de correlación  $r$  de Pearson de los sitios priorizados de los tres agrupamientos mayores mientras que los valores en color rojo corresponden a la prueba de autocorrección espacial  $t$ -modified. Para ambos casos los valores de significancia estadística ( $p$ ) están mostrados entre paréntesis.*

	<b>Invertebrados</b>	<b>Plantas</b>	<b>Vertebrados</b>
<b>Invertebrados</b>	–	0.29 ( $< 0.001$ ) <b>0.10</b> <b>(0.22)</b>	0.10 ( $< 0.001$ ) <b>0.39</b> <b>(<math>&lt; 0.001</math>)</b>
<b>Plantas</b>	–	–	0.55 (0.001) <b>0.55</b> <b>(<math>&lt; 0.001</math>)</b>

Este es un resultado que es igualmente observado al comparar las curvas de rendimiento (superficie protegida vs. Representatividad de especies) obtenidas como resultados del Zonation para cada uno de los ejercicios realizados, tanto para grupos taxonómicos por separado como en agrupamientos mayores (Figura 8). De hecho, si comparamos los valores obtenidos basados en la meta de conservar al menos el 17% de superficie, se puede observar las diferentes obtenidas para los grados de representatividad cubiertas en cada uno de los casos. Por ejemplo se observa que para los mamíferos si se protege el 17% del área de la superficie de la FVT se protegería, en promedio, el 61% de la distribución de las especies consideradas, mientras que para las plantas esa meta del 17%

de superficie representa valores de representatividad del 75% de la distribución de las especies. En el caso de los anfibios se observó valores del 80% de representatividad de la distribución de las especies, y para los insectos valores de hasta 92% de la distribución al proteger el 17% de superficie de la FVT. El juntar los datos de todos los grupos vertebrados y su uso en el programa Zonation permite la identificación de áreas prioritarias que, al considerar la meta de un 17% de protección de la superficie, muestra valores de representatividad del 71% de la distribución de las especies.

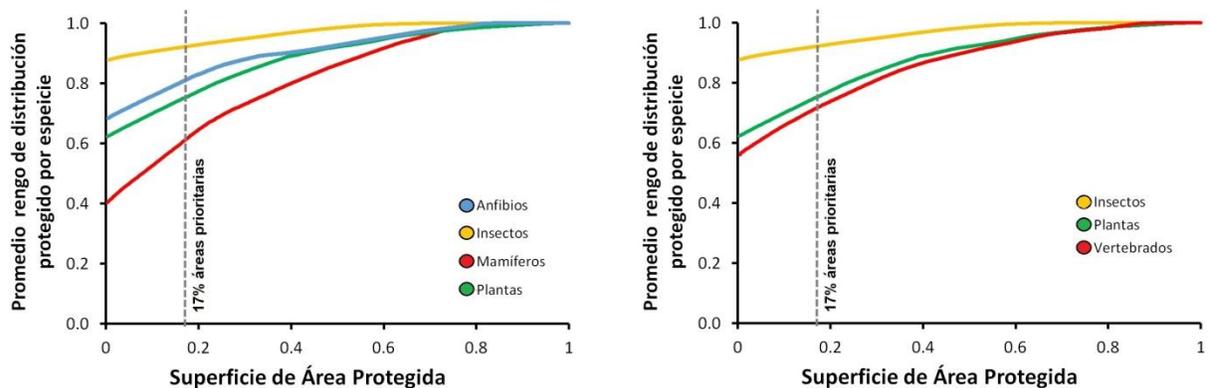


Figura 8 a) Promedio del rango de distribución protegido por especies de los grupos taxonómicos con respecto a la superficie de área protegida. (b) Promedio del rango de distribución protegido por especies de los agrupamientos mayores con respecto a la superficie de áreas protegidas.

Desde una perspectiva espacial, al comparar el porcentaje de coincidencia de los sitios priorizados para cada grupo taxonómico analizando con base a esa meta del 17% (23,197 km<sup>2</sup>) de superficie protegida, se observó que solo un 3.24% (2,004 km<sup>2</sup>) de la superficie obtenida al sumar los seis mapas de priorización fue identificada como sitios prioritarios por todos los grupos evaluados (Figura 9). Un 7.18% (4,447 km<sup>2</sup>) de la superficie fue mostrada como una solución congruente por al menos cinco grupos, un 9.98% (6,174 km<sup>2</sup>) por al menos cuatro grupos y 13.76% (8,517 km<sup>2</sup>) por al menos tres grupos. Curiosamente, un alto número de sitios fueron obtenidos como solución (es decir, sitios prioritarios de conservación) por al menos dos grupos 22.31% (13,803 km<sup>2</sup>), y por solo un taxón 43.51% (26,902 km<sup>2</sup>).

En general, tres grupos (anfibios, vertebrados y plantas) representarían congruencias espaciales mayores al 30% entre los sitios priorizados identificados con base a la

información de sus especies y aquellos sitios identificados por los demás grupos. Este resultado surge que si, por ejemplo se utilizaran a los anfibios como subrogados, estos representarían eficientemente un 59% de los sitios mejores priorizados de los vertebrados, un 57% de los sitios de las Plantas, el 17% de los sitios para insectos, un 29% de los sitios del ave y el 29% de los sitios mejores priorizados para los mamíferos (Cuadro 6). Además es importante resaltar que este 17% de áreas priorizadas, en el caso de los anfibios, protegería sitios con promedios del 9.4 spp de plantas, 6 spp de insectos, 9.4 spp de vertebrados, 4.1 spp de anfibios, y 4.8 spp de mamíferos (Cuadro 7).

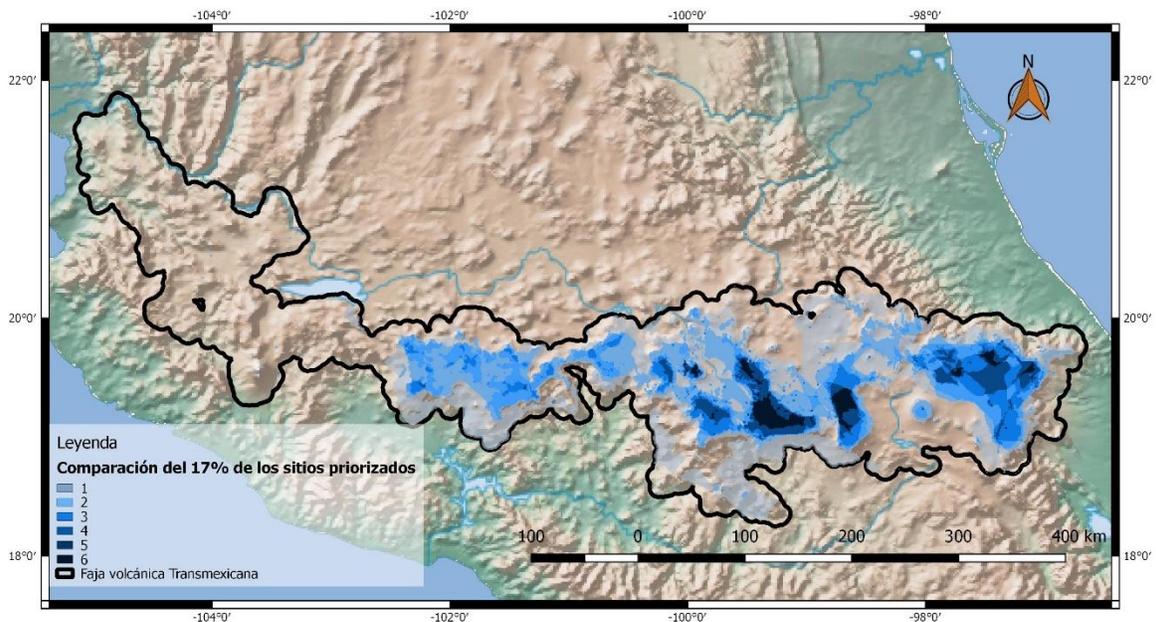


Figura 9. Coincidencia espacial del 17% de superficie de la Faja Volcánica Trnsmexicana priorizada por Zonation considerando los resultados de los grupos taxonómicos aquí evaluados: Anfibios, aves, insectos, mamíferos, plantas y vertebrados. Colores en el mapa representan el grado de coincidencia obtenido para 1 grupo, 2 grupos, 3 grupos, 4 grupos, 5 grupos y 6 grupos, respectivamente.

Por otra parte, la utilización del grupo junto de las especies de vertebrados coincide en un 35% con los sitios priorizados por el resto de los otros grupos individualmente. Estas áreas priorizadas por los vertebrados representan eficientemente el 59% de los sitios mejores priorizados por los anfibios, 42% de los sitios mejores sitios por los mamíferos, 31% resultante de las plantas, el 28% de las superficies identificadas por el ave y el 15% de los sitios mejores priorizados para los insectos. Además dentro de este porcentaje de las áreas mejores priorizadas para los vertebrados resguardan el 9.2 spp de la riqueza de vertebrados, además el 8.9 spp de la riqueza de plantas, 5.7 spp de insectos, el 4.1 de los

anfibios y el 4.8 spp de la riqueza de los mamíferos, que es más de la mitad de la riqueza de diversidad biológica de la FVT. El tercer grupo, las plantas, mostró una coincidencia espacial promedio con los demás grupos del 32%, y surge que ese 17% de superficie protegida coincide un 31% con los sitios identificados por los vertebrados, el 19% de los insectos, el 57% de los anfibios, el 32% de la superficie priorizada por el ave y el 23% de los mamíferos. Estas áreas además protegen más de la mitad de la riqueza de los grupos [plantas (10.5 spp), vertebrados (8.8 spp), insectos (6.8 spp), mamíferos (4.9 spp) y anfibios (3.5 spp)].

*Cuadro 6.* Porcentaje de coincidencia espacial del 17% de superficie protegida identificada en los análisis de priorización de Zonación de forma individual para cada grupo taxonómico aquí analizado. En rojo están los valores más altos de coincidencia observada.

	<b>Vertebrados</b>	<b>Plantas</b>	<b>Insectos</b>	<b>Anfibios</b>	<b>Aves</b>	<b>Mamíferos</b>	<b>Promedio</b>
<b>Invertebrados</b>	15%	19%	–	17%	27%	15%	<b>19%</b>
<b>Plantas</b>	31%	–	19%	57%	32%	23%	<b>32%</b>
<b>Vertebrados</b>	–	31%	15%	59%	28%	42%	<b>35%</b>
<b>Anfibios</b>	59%	57%	17%	–	29%	29%	<b>38%</b>
<b>Aves</b>	28%	32%	27%	29%	–	23%	<b>28%</b>
<b>Mamíferos</b>	42%	23%	15%	29%	23%	–	<b>26%</b>

Por el contrario, la utilización de invertebrados como grupos subrogado para definir el 17% de áreas prioritarias a proteger en la FVT solo garantiza, en promedio, una coincidencia espacial del 19% de los sitios con el resto de los grupos: 15% de los sitios mejores priorizados de los vertebrados, un 19% de los sitios de las Plantas, el 17% de los sitios para anfibios, un 27% de los sitios del ave y el 15% de los sitios priorizados para los mamíferos (*Cuadro 6*). Además, estas áreas priorizadas, a diferencia del caso en los anfibios, protegería en promedio sitios con 8.1 spp de plantas, 6.3 spp de insectos, 6.5 spp

de vertebrados, 2.6 spp de anfibios y 3.6 spp de mamíferos (*Cuadro 7*). Estos resultados demuestran que los anfibios protegen más del doble de la riqueza de la diversidad biológica de la FVT con respecto a sus sitios mejor priorizados.

*Cuadro 7.* Valores promedio y máximo de riqueza de especies dentro del 17% de superficie de la Faja Volcánica Transmexicana identificada como áreas prioritarias por cada grupo taxonómico. En rojo se muestran los valores máximo obtenidos para los tres grupos con mayor coincidencia espacial según el cuadro 6.

<b>Riqueza Sitios priorizados</b>	<b>Plantas</b>	<b>Insectos</b>	<b>Vertebrados</b>	<b>Anfibios</b>	<b>Mamíferos</b>
<b>Plantas</b>	<b>10.5 (14)</b>	<b>6.8 (13)</b>	<b>8.8 (14)</b>	<b>3.5 (7)</b>	<b>4.9 (8)</b>
<b>Insectos</b>	8.1 (14)	6.3 (13)	6.5 (14)	2.6 (7)	3.6 (7)
<b>Vertebrados</b>	<b>8.9 (14)</b>	<b>5.7 (13)</b>	<b>9.2 (14)</b>	<b>3.9 (8)</b>	<b>4.9 (8)</b>
<b>Anfibios</b>	<b>9.4 (14)</b>	<b>6.0 (13)</b>	<b>9.4 (14)</b>	<b>4.1 (8.0)</b>	<b>4.8 (7)</b>
<b>Mamíferos</b>	8.7 (14)	5.6 (13)	9.0 (14)	3.7 (7)	5.0 (8)
<b>Aves</b>	10.2 (14)	7.2 (13)	9.5 (14)	3.8 (7)	4.9 (7)

Aunque en algunas investigaciones la priorización de áreas de conservación se desarrolla utilizando en su mayoría sólo un patrón biogeográfico como la riqueza (Luna-Vega *et al.*, 2010; Morales *et. al.*, 2016), el riesgo de dejar a otras especies desprotegidas es alto pues una buena solución no es un conjunto de sitios más ricos, sino un conjunto de sitios cuyos conjuntos de especies se complementen entre sí y capturen colectivamente el mayor número de especies (Margules y Pressey, 2000). Por lo tanto, si sólo se consideran los patrones espaciales de riqueza de los agrupamientos mayores (los cuales presentan una alta correlación espacial entre los patrones espaciales de riqueza), a pesar de que haya una correlación  $< 0.7$  entre ellos mismos, este resultado no brinda la información necesaria y detalla para inferir la eficacia de un grupo de subrogados de la biodiversidad de la FVT.

En este estudio, se observó, como era esperado, que estadísticamente la utilización de una sola especie —como en el caso del ave—, no proporciona ninguna información certera ya que mientras más datos (en este caso más especies) tenga una prueba estadística más certero será el análisis. Es por ello que para este caso se obtuvieron los valores más bajos de correlación entre los patrones espaciales de riqueza.

Las especies endémicas y raras se han utilizado o propuesto comúnmente como subrogados en proyectos de conservación e identificación de áreas prioritarias (Urquiza-Haas *et al.*, 2019). En México los anfibios y mamíferos son grupos que presentan especies con alto grado de endemismos y rareza geográfica mayor al de los otros grupos taxonómicos (Urquiza-Haas *et al.*, 2011). Por ende, existen trabajos similares en donde emplean mamíferos como subrogados para identificar áreas de conservación en la FVT (Fuller *et al.* (2006); Morales *et al.*, 2016). Entre ellos, en el estudio de Morales y colaboradores (2016) los autores realizaron un análisis de áreas de priorización e identificaron el rendimiento de las Áreas Naturales Protegidas (ANP) del Componente Mexicano de Montaña (CMM), en el cual se priorizó el 30 % del área de la FVT.

Sin embargo, de acuerdo con los resultados de la presente tesis, los mamíferos no representan adecuadamente la biodiversidad, ya que no tienen una correlación mayor a 0.7 en los sitios prioritarios. Esto podría deberse a que algunas especies de mamíferos no interactúan con algunas de las otras especies de los otros grupos taxonómicos ya que presentan distribuciones más restringidas que las otras especies de los grupos otros grupos taxonómicos endémicos de la FVT. Por lo tanto, algunas de las priorizaciones de estas especies raras no coinciden con de otras especies. Considerando este escenario, es necesario evaluar la eficacia de los subrogados para que puedan garantizar la protección de otras especies. Como se ha establecido en otras investigaciones sobre la identificación de subrogados (Fuller *et al.* 2006; Urquiza-Haas *et al.*, 2011 y 2019; Morales *et al.*, 2016), se observa que los anfibios, las plantas y los vertebrados representan a más de la mitad de las especies de los otros grupos, pero ninguno logra cubrir la totalidad de las especies de los grupos examinados de la FVT. Esto es debido a que no hay correlaciones espaciales superiores a 0.7 en los patrones de rareza, ya que a pesar de ser especies endémicas a la FVT, la mayoría de las especies en este trabajo presentan distribuciones restringidas a ciertas y variadas zonas de la Faja Volcánica. Por ejemplo, *Romerolagus diazi* (Rizo-

Aguilar *et al.*, 2014) es catalogada como especie endémica a los parches centrales de la FVT; en cambio, *Neotoma nelsoni* (González-Ruíz *et al.*, 2009) se distribuye solo en el Este de la Faja entre los volcanes de Pico de Orizaba y Cofre de Perote; mientras que algunas distribuciones de plantas sólo tienen dos localidades tales como *Mammillaria backebergiana* que se distribuye en la parte Sur, *Mammillaria fittkau* en la parte Suroeste y *Mammillaria knippeliana* en el Sureste de la Faja Volcánica Transmexicana (Hernández y Gómez-Hinostrosa, 2015).

Los grupos más eficientes en la coincidencia espacial en los sitios priorizados fueron las plantas, los vertebrados y los anfibios, con valores mayores al 30% (32%, 35% y 38%, respectivamente). Estudios similares como el de Urquiza-Haas y colaboradores (2011) encontraron que los vertebrados son considerados como un grupo efectivo para representar a especies de plantas e insectos puesto que presentan similitudes ecológicas. En este trabajo los vertebrados obtuvieron correlaciones  $< 0.7$  entre los patrones de riqueza de los invertebrados y plantas, una correlación moderada con las plantas en los sitios priorizados, y una coincidencia espacial mayor del 30% con los sitios mejor priorizados de los otros grupos. Por lo tanto los vertebrados podrían ser efectivos para representar a la biodiversidad de la FVT.

Si bien los anfibios presentan más de la mitad de la riqueza de las especies dentro de sus mejores áreas priorizadas, de acuerdo a los análisis de las correlaciones espaciales de riqueza, la correlación de sus sitios priorizados no fue tan efectiva. No obstante, al considerar la meta propuesta de proteger el 17% de superficie de la FVT, los anfibios son el grupo que mejor representan más de la mitad de los valores de riqueza de las especies dentro de sus mejores sitios priorizados. Además representa el 38% del promedio de la coincidencia espacial de los demás grupos.

En general, aunque el uso de subrogados sea una parte fundamental para proyectos de conservación, no es posible predecir la efectividad de estos a largo plazo debido a que depende si se usa un grupo limitado de especies de la diversidad total de una región. Por tal motivo es recomendable utilizar toda la diversidad posible de una región para establecer metas de conservación, además de incorporar factores sociales, políticos y económicos (Urquiza-Haas *et al.*, 2011).

## Conclusiones

1. En general, los resultados que se obtuvieron de la presente tesis, demuestran que los vertebrados, plantas y anfibios podrían ser considerados como posibles candidatos subrogados para representar los valores de biodiversidad biológica entera de la FVT. No obstante, es recomendable considerar a más grupos taxonómicos para tener la mayor representación posible de la biodiversidad de la FVT con el fin de priorizar sitios para la conservación.
2. A pesar de la alta correlación entre los patrones de riqueza de algunos grupos taxonómicos, ninguno de los grupos individuales fue capaz de reproducir el 100% de los resultados mostrados por el resto de los grupos individualmente. Se presenta un comportamiento semejante para los agrupamientos mayores. No obstante, los vertebrados, plantas y anfibios —como potenciales candidatos subrogados— mostraron en promedio los valores más altos de congruencia espacial ( $> 30\%$ ) con respecto al 17% de superficie de la FVT identificada como áreas prioritarias por resto de los grupos analizados. Estas áreas de congruencia llegan incluso a proteger más de la mitad de la riqueza de especies de los demás grupos taxonómicos.
3. Considerando los grados de coincidencia espacial, tanto para los patrones de riqueza de especies raras y los sitios prioritarios identificados por cada uno de los grupos analizados, es recomendable establecer un programa de priorización en el lado Este (que incluyen a los estados de Puebla, Estado de México, Veracruz, Tlaxcala) de la Faja Volcánica Transmexicana.

## Anexo 1. Detalles de los datos usados en la modelación de la distribución geográfica

**Cuadro A1.** Especies empleadas en este estudio. En la primera columna se muestran los cinco grupos taxonómicos que se utilizaron. En la segunda columna indica los agrupamientos mayores donde: V= Vertebrados I= Invertebrados, P= Plantas; mientras que en la tercera columna se muestran los nombres de las especies. En la cuarta columna se encuentran los puntos de cada especie y en la quinta los puntos filtrados. Finalmente la última columna presenta los puntos utilizados en los modelos de acuerdo al siguiente formato:

\*: Especies no modeladas con cinco o menos puntos de datos, rasterizadas con un buffer de 2 km.

†: Especies no modeladas con menos de seis puntos de datos filtrados.

+ : Especies con 6 a 24 puntos filtrados fueron modelados y aprobados mediante validación de Pearson.

‡: Especies con 6 o más puntos pero cuyos modelos no tuvieron un buen rendimiento; fueron rasterizados con un buffer de 2 km.

⌘ Especies con 25 o más puntos filtrados, fueron modelados y aprobados mediante la validación de ENMeval.

Taxa	Grupo	Especie	Número de puntos	Número de puntos filtrados	Número de puntos usados en entrenamiento
Anfibios	V	<i>Ambystoma altamirani</i>	74	19	18+ ‡
Anfibios	V	<i>Ambystoma amblycephalum</i>	27	16	15+
Anfibios	V	<i>Ambystoma andersoni</i>	7	1	†
Anfibios	V	<i>Ambystoma bombypellum</i>	1	*	*
Anfibios	V	<i>Ambystoma dumerilii</i>	16	2	†

Anfibios	V	<i>Ambystoma flavipiperatum</i>	19	11	10+
Anfibios	V	<i>Ambystoma granulosum</i>	43	19	18+ ‡
Anfibios	V	<i>Ambystoma leorae</i>	8	3	†
Anfibios	V	<i>Ambystoma lermaense</i>	23	9	8+ ‡
Anfibios	V	<i>Ambystoma mexicanum</i>	26	11	10+ ‡
Anfibios	V	<i>Ambystoma ordinarium</i>	25	11	10+
Anfibios	V	<i>Ambystoma rivulare</i>	27	12	11+ ‡
Anfibios	V	<i>Ambystoma taylori</i>	5	*	*
Anfibios	V	<i>Ambystoma velasci</i>	41	29	22☁
Anfibios	V	<i>Chiropterotriton orculus</i>	11	9	8+ ‡
Anfibios	V	<i>Eleutherodactylus grandis</i>	6	2	†
Anfibios	V	<i>Eleutherodactylus maurus</i>	9	6	5+
Anfibios	V	<i>Lithobates chichicuahutla</i>	1	*	*
Anfibios	V	<i>Lithobates dunni</i>	29	10	9+ ‡
Anfibios	V	<i>Lithobates megapoda</i>	72	44	33☁
Anfibios	V	<i>Lithobates tlaloci</i>	9	6	5+ ‡
Anfibios	V	<i>Pseudoeurycea altamontana</i>	23	8	7+
Anfibios	V	<i>Pseudoeurycea gadovii</i>	29	14	13+
Anfibios	V	<i>Pseudoeurycea longicauda</i>	6	4	†
Anfibios	V	<i>Pseudoeurycea robertsi</i>	33	10	9+ ‡
Aves	V	<i>Picoides stricklandi</i>	18	13	12+
Insectos	I	<i>Acronyctodes mexicanaria</i>	36	23	22+
Insectos	I	<i>Aedes niveoscutum</i>	2	*	*
Insectos	I	<i>Aeschnopteryx marciiana</i>	2	*	*
Insectos	I	<i>Aeshna williamsoniana</i>	3	*	*
Insectos	I	<i>Agylla idolon</i>	5	*	*
Insectos	I	<i>Andrena fulminea</i>	12	6	5+ ‡
Insectos	I	<i>Aphodius ophistius</i>	1	*	*
Insectos	I	<i>Apicia remorta</i>	3	*	*
Insectos	I	<i>Aptinothrips rufus</i>	2	*	*
Insectos	I	<i>Atopsyche boneti</i>	1	*	*
Insectos	I	<i>Aztecatoxpe amorimi</i>	1	*	*
Insectos	I	<i>Bembidion submaculatum</i>	24	3	†
Insectos	I	<i>Bolla semitincta</i>	5	*	*
Insectos	I	<i>Calathus aztec</i>	36	12	11 +
Insectos	I	<i>Calosoma laevigatum</i>	4	*	*

Insectos	I	<i>Cediopsylla tepolita</i>	6	2	†
Insectos	I	<i>Ceratophyllus gilvus</i>	3	*	*
Insectos	I	<i>Chaetisothrips reticulatus</i>	1	*	*
Insectos	I	<i>Chaetisothrips striatus</i>	1	*	*
Insectos	I	<i>Chilicola mexicana</i>	4	*	*
Insectos	I	<i>Chirothrips falsus</i>	2	*	*
Insectos	I	<i>Chirothrips orizaba</i>	5	*	*
Insectos	I	<i>Colletes bryanti</i>	2	*	*
Insectos	I	<i>Coloradia euphrosyne</i>	28	12	11+
Insectos	I	<i>Copestylum alberlena</i>	2	*	*
Insectos	I	<i>Culicoides albomaculata</i>	2	*	*
Insectos	I	<i>Culicoides bakeri</i>	2	*	*
Insectos	I	<i>Culicoides copiosus</i>	3	*	*
Insectos	I	<i>Culicoides dampfi</i>	2	*	*
Insectos	I	<i>Culicoides wirthomyia</i>	1	*	*
Insectos	I	<i>Dactylopsylla megasoma</i>	6	3	†
Insectos	I	<i>Dianthidium discophorum</i>	11	6	5+
Insectos	I	<i>Dyscolus machetellus</i>	4	*	*
Insectos	I	<i>Erpetogomphus boa</i>	2	*	*
Insectos	I	<i>Euchaetes psara</i>	6	4	†
Insectos	I	<i>Foxella macgregori</i>	6	2	†
Insectos	I	<i>Frankliniella chamulae</i>	1	*	*
Insectos	I	<i>Frankliniella simplex</i>	8	5	†
Insectos	I	<i>Golofa globulicornis</i>	7	7	6+
Insectos	I	<i>Halfferius rufoclavatus</i>	38	12	11+
Insectos	I	<i>Heliscus eclipticus</i>	1	*	*
Insectos	I	<i>Holomelina polyphron</i>	8	8	7+
Insectos	I	<i>Hormopsylla trux</i>	2	*	*
Insectos	I	<i>Hydraecia arnymai</i>	2	*	*
Insectos	I	<i>Hypercompe andromela</i>	23	16	15+ †
Insectos	I	<i>Hypocrisias lisoma</i>	13	9	8+
Insectos	I	<i>Hyssia plenipotencia</i>	2	*	*
Insectos	I	<i>Lejops mexicanus</i>	7	4	†
Insectos	I	<i>Lepidostoma aztecum</i>	2	*	*
Insectos	I	<i>Leucanopsis perdentata</i>	7	7	6+ †
Insectos	I	<i>Melipona colimana</i>	2	*	*

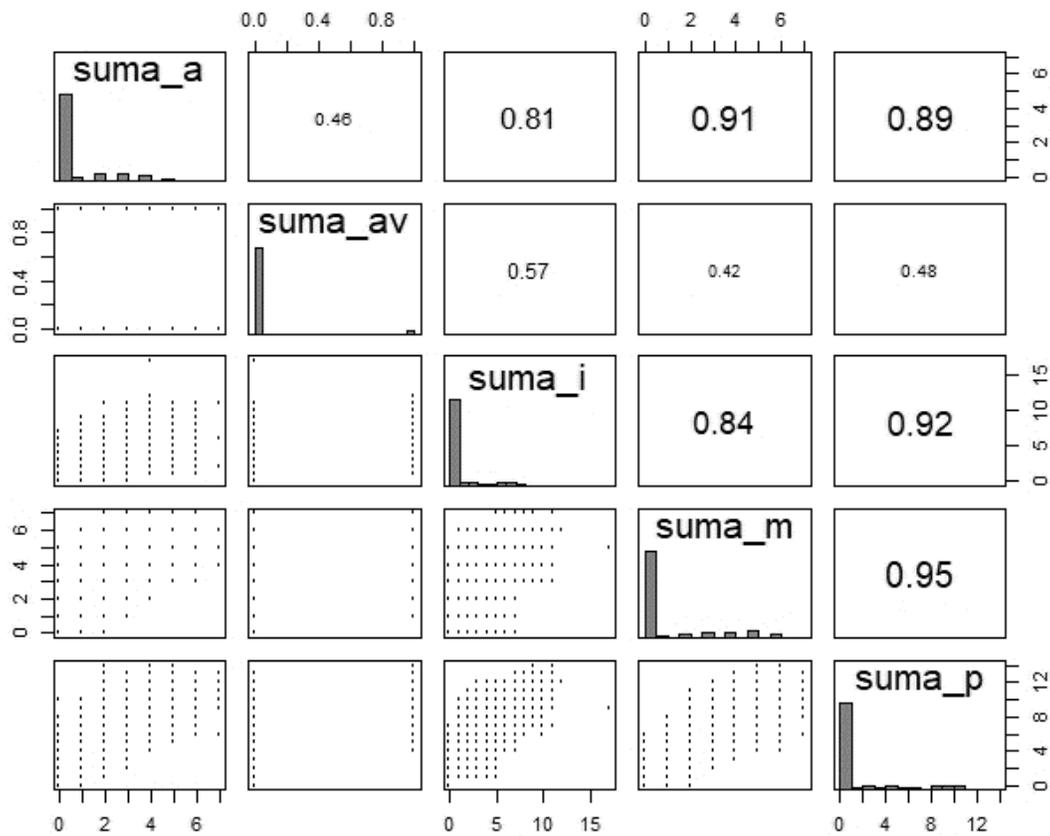
Insectos	I	<i>Metacrisiodes pua</i>	2	*	*
Insectos	I	<i>Mexalictus mexicanus</i>	15	2	†
Insectos	I	<i>Mydas annularis</i>	4	*	*
Insectos	I	<i>Mydrosoma bohartorum</i>	4	*	*
Insectos	I	<i>Neohydatothrips tibialis</i>	1	*	*
Insectos	I	<i>Nephelistis oomae</i>	2	*	*
Insectos	I	<i>Nyctosia poicilonotus</i>	12	7	6+
Insectos	I	<i>Olceclostera maya</i>	5	*	*
Insectos	I	<i>Onthophagus hippopotamus</i>	2	*	*
Insectos	I	<i>Onthophagus subcancer</i>	15	2	†
Insectos	I	<i>Onthotrupes herbeus</i>	29	12	11+
Insectos	I	<i>Orchopeas neotomae</i>	6	3	†
Insectos	I	<i>Osmia aliciae</i>	16	10	9+ ‡
Insectos	I	<i>Panorpa umbricola</i>	1	*	*
Insectos	I	<i>Passalus mucronatus</i>	1	*	*
Insectos	I	<i>Petrejoides jalapensis</i>	2	*	*
Insectos	I	<i>Pheidole skwarrae</i>	6	2	†
Insectos	I	<i>Platynus machetellus</i>	4	*	*
Insectos	I	<i>Plusaetis aztecus</i>	35	10	9+
Insectos	I	<i>Proculejus brevis</i>	13	11	10+ ‡
Insectos	I	<i>Pseudacanthus mexicanus</i>	11	4	†
Insectos	I	<i>Pseudoprocris gracilis</i>	8	6	5+ ‡
Insectos	I	<i>Pyrrharctia genini</i>	6	6	5+ ‡
Insectos	I	<i>Richia aphronus</i>	2	*	*
Insectos	I	<i>Saurita ochracea</i>	4	*	*
Insectos	I	<i>Schizura tomaea</i>	2	*	*
Insectos	I	<i>Simulium contrerense</i>	3	*	*
Insectos	I	<i>Simulium dalmati</i>	1	*	*
Insectos	I	<i>Somatolophia umbripennis</i>	2	*	*
Insectos	I	<i>Sonorarctia nundar</i>	10	8	7+ ‡
Insectos	I	<i>Spurius depressifrons</i>	18	11	10+ ‡
Insectos	I	<i>Templemania millistriata</i>	1	*	*
Insectos	I	<i>Thrassis fotas</i>	2	*	*
Insectos	I	<i>Thrips simplex</i>	1	*	*
Insectos	I	<i>Trichonotuloides glyptus</i>	23	3	†
Insectos	I	<i>Xenodromius flohri</i>	10	2	†

Insectos	I	<i>Yumtaax cameliae</i>	3	*	*
Insectos	I	<i>Yumtaax jimenezi</i>	5	*	*
Mamíferos	V	<i>Cratogeomys fumosus</i>	27	22	21+
Mamíferos	V	<i>Cratogeomys gymnurus</i>	46	23	22+
Mamíferos	V	<i>Cratogeomys merriami</i>	182	70	52☼
Mamíferos	V	<i>Cratogeomys tylosinus</i>	108	64	48☼
Mamíferos	V	<i>Megadontomys nelsoni</i>	3	*	*
Mamíferos	V	<i>Nelsonia goldmani</i>	13	5	†
Mamíferos	V	<i>Neotoma nelsoni</i>	4	*	*
Mamíferos	V	<i>Neotomodon alstoni</i>	467	86	64☼
Mamíferos	V	<i>Peromyscus bullatus</i>	25	12	11+
Mamíferos	V	<i>Reithrodontomys chrysopsis</i>	106	39	29☼‡
Mamíferos	V	<i>Reithrodontomys hirsutus</i>	17	10	9+ ‡
Mamíferos	V	<i>Romerolagus diazi</i>	116	23	22+
Mamíferos	V	<i>Sorex macrodon</i>	23	9	7+ ‡
Mamíferos	V	<i>Spermophilus perotensis</i>	34	18	17+
Mamíferos	V	<i>Zygoeomys trichopus</i>	37	13	12+
Plantas	P	<i>Carex cochranii</i>	1	*	*
Plantas	P	<i>Carex hermannii</i>	14	4	†
Plantas	P	<i>Carex tuberculata</i>	37	16	15+
Plantas	P	<i>Cirsium jorullense</i>	77	30	22☼
Plantas	P	<i>Cirsium lomatolepis</i>	4	*	*
Plantas	P	<i>Coryphantha pycnantha</i>	6	6	7+ ‡
Plantas	P	<i>Eleocharis subcancellata</i>	5	*	*
Plantas	P	<i>Eryngium subacaule</i>	47	20	19+
Plantas	P	<i>Gentiana perpusilla</i>	4	*	*
Plantas	P	<i>Halenia pringlei</i>	23	13	12+
Plantas	P	<i>Jaegeria bellidiflora</i>	79	36	27 ☼
Plantas	P	<i>Jaegeria pedunculata</i>	70	29	22☼‡
Plantas	P	<i>Mammillaria backebergiana</i>	2	*	*
Plantas	P	<i>Mammillaria discolor</i>	24	20	19+
Plantas	P	<i>Mammillaria fittkaui</i>	2	*	*
Plantas	P	<i>Mammillaria knippeliana</i>	2	*	*
Plantas	P	<i>Mammillaria meyranii</i>	4	*	*
Plantas	P	<i>Mammillaria nunezii</i>	6	5	†
Plantas	P	<i>Mammillaria pringlei</i>	6	6	5+ ‡

Plantas	P	<i>Mammillaria rhodantha</i>	49	36	27☼
Plantas	P	<i>Mammillaria scrippsiana</i>	12	12	11+ †
Plantas	P	<i>Mammillaria spinosissima</i>	6	4	†
Plantas	P	<i>Mammillaria wiesingeri</i>	1	*	*
Plantas	P	<i>Psacalium tussilaginoide</i> s	46	15	14+
Plantas	P	<i>Quercus aculcingensis</i>	1	*	*
Plantas	P	<i>Quercus diversifolia</i>	66	41	31☼
Plantas	P	<i>Quercus frutex</i>	228	73	55☼
Plantas	P	<i>Quercus leiophylla</i>	22	13	12+ †
Plantas	P	<i>Quercus pachucana</i>	1	*	*
Plantas	P	<i>Quercus repanda</i>	41	18	17+
Plantas	P	<i>Quercus subtriloba</i>	3	*	*
Plantas	P	<i>Senecio helodes</i>	28	11	10+ †
Plantas	P	<i>Senecio jacalensis</i>	13	5	†
Plantas	P	<i>Solidago paniculata</i>	28	11	10+
Plantas	P	<i>Stenocactus obvallatus</i>	10	4	†
Plantas	P	<i>Trichocoronis sessilifolia</i>	24	11	10+
Plantas	P	<i>Xyris mexicana</i>	42	13	12+

## Anexo 2. Efectividad de los subrogados

Figura 1. Correlación de Pearson de los patrones de riqueza de los cinco grupos taxonómicos. Los nombres que se utilizaron para representar cada patrón de riqueza en las correlaciones son los siguientes: Suma\_a: patrón de riqueza para anfibios; Suma\_av: patrón de riqueza para aves; Suma\_i: patrones de riqueza para insectos; Suma\_m: patrones de riqueza para mamíferos y Suma\_p: patrones de riqueza para Plantas.



*Figura II.* Correlación de Pearson de los patrones de riqueza de los agrupamientos mayores. Los nombres que se utilizaron para representar cada patrón de riqueza en las correlaciones son los siguientes: Suma\_i: patrón de riqueza para invertebrados; Suma\_p: patrón de riqueza para plantas; Suma\_v: patrones de riqueza para vertebrados.

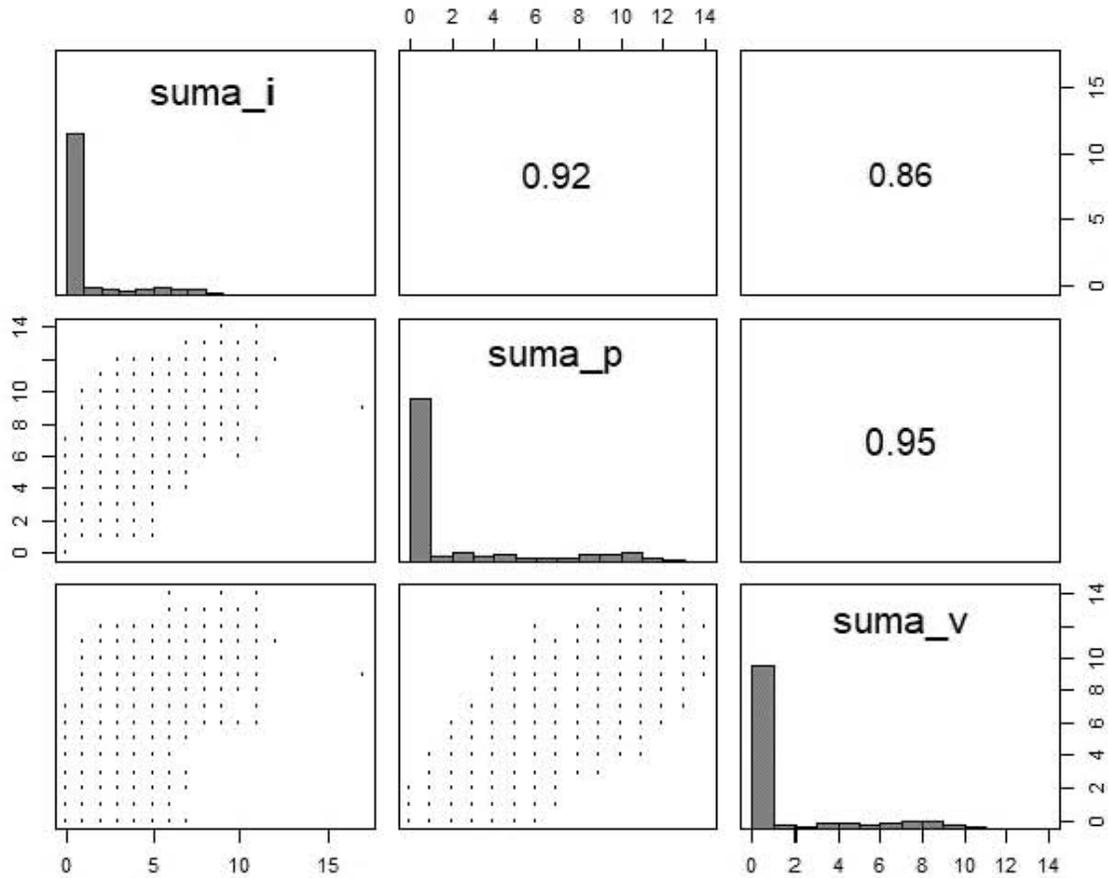


Figura III. Correlación de Pearson de las áreas priorizadas de los cinco grupos taxonómicos. Nombres para representar cada correlación de las áreas priorizadas: a: áreas priorizadas para anfibios; av: áreas priorizadas para aves; i: áreas priorizadas para insectos; m: áreas priorizadas para mamíferos y p: áreas priorizadas para plantas.

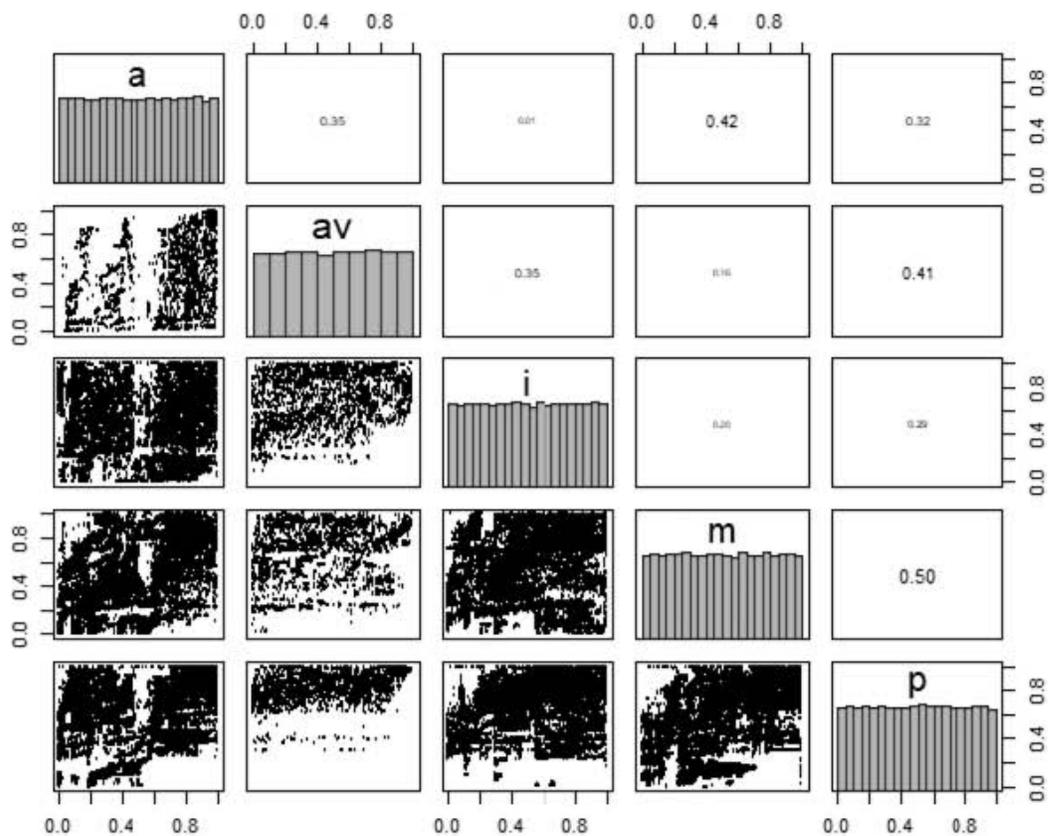
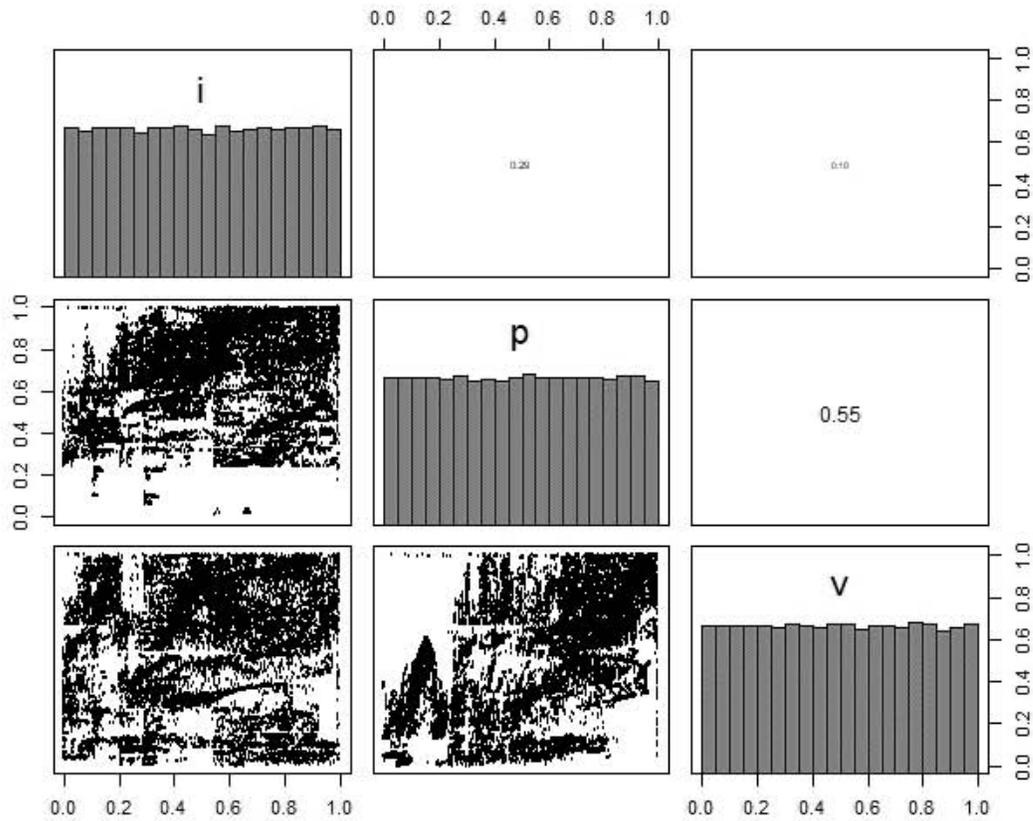


Figura IV. Correlación de Pearson de las áreas priorizadas de los agrupamientos mayores. Nombres para representar cada correlación: i: áreas priorizadas para invertebrados; p: áreas priorizadas para plantas y v: áreas priorizadas para vertebrados.



## Referencias

- Aiello-Lammens, M. E., Boria, R. A., Radosavljevic, A., Vilela, B., y Anderson, R. P. (2015). spThin: An R package for spatial thinning of species occurrence records for use in ecological niche models. *Ecography*, (38), 541-545.
- Albuquerque, F., y Beier, P. (2015). Rarity-Weighted Richness: A Simple and Reliable Alternative to Integer Programming and Heuristic Algorithms for Minimum Set and Maximum Coverage Problems in Conservation Planning. *PLOS ONE*, 10(3), 1-8. doi:10.1371/journal.pone.0119905
- Álvarez, E., Morrone, J.J. (2004) Propuestas de áreas para conservación de aves terrestres de México, empleando herramientas panbiogeográficas e índices de complementariedad. *Interciencia* (29), 112-120.
- Anderson, R., y Raza, A. (2010). The effect of the extent of the study region on GIS of species geographic distributions and estimates of niche evolution: preliminary tests with montane rodents (genus *Nephelomys*) en Venezuela. *Journal of Biogeography*, (37), 1378-1393.
- Arita, H. T.; Dávila, P.; Flores-Villela, F.; Golubov, J.; Halfpter, G.; Lira-Noriega, A.; Moreno, C. E.; Moreno, E.; Munguía, M.; Murguía, M.; Navarro-Sigüenza, A. G.; Téllez, O.; Ochoa-Ochoa, L.; Peterson, A. T.; Rodríguez, P. (2008). Patrones de diversidad espacial en grupos selectos de especies. En J. Soberón, G. Halfpter, y J. Llorente-Bousquets, *Capital natural de México: Conocimiento actual de la biodiversidad* (Vol. 1, págs. 323-364). México: CONABIO. doi:ISBN 978-607-7607-03-8
- Ball, I. R., y Possingham, H. P. (2000). *Marxan (v.1.8.6): Marine reserve desing using satially explicit annealing*. Recuperado el 07 de 02 de 2019, de <http://www.uq.ed.au/marxan>
- Barrera-Moreno, O., Escalante, T., y Rodríguez, G. (2011). Panbiogeografía y modelos digitales de evaluación: un caso de estudio con roedores en la Faja Volcánica Transmexicana. *Norte Grande*, (48), 11-25.

- Beger, M., Mckenna, S. A., y Possingham, H. P. (2007). Effectiveness of surrogate taxa in the design of coral reef reserve systems in the Indo-Pacific. *Wiley Society for Conservation Biology*, 21(6), 1584-1593.
- Beier, P., y Albuquerque, F. (2016). Evaluating  $\beta$  diversity as a surrogate for species representation at fine scale. *Plos One*, 11(3), 1-9. doi:10.1371/journal.pone.0151048
- Boria, R. A., Olson, L. E., Goodman, S. M., y Anderson, R. P. (2014). Spatial filtering to reduce sampling bias can improve the performance of ecological models. *Ecological Modelling*, 275, 73-77.
- Brown, J. H., y Lomolino, M. V. (1998). *Biogeography* (2nd. ed.). Massachusetts, Sunderland: Sinauer Associates.
- Carrascal, L. M., y Palomino, D. (2006). Rareza, estatus de conservación y sus determinantes ecológicos. Revisión de su aplicación a escala regional. *Graellsia*, 62, 523-538.
- Cedillo, O., Rivas, M. y Rodríguez, N. (2007). El Área Natural Protegida sujeta a conservación ecológica "Sierra de Guadalupe". *Sistemas Ambientales*, 1(1), 1-14.
- Ciarleglio, M., Wesley-Barnes, J., y Sarkar, S. (2009). ConsNet: new software for the selection of conservation area networks with spatial and multi-criteria analyses. *Ecography*, 35(2), 205-209. doi:10.1111/j.1600-0587.2008.05721.x
- CONABIO. (2017). *Red Mexicana de Información sobre Biodiversidad*. Recuperado el 4 de abril de 2017, de <http://www.biodiversidad.gob.mx>
- Cuervo-Robayo, A., Gómez-Albores, M., Téllez-Valdés, O., y Martínez-Meyer, E. (2013). One-hundred years of climatic change in Mexico. Recuperado el 24 de julio de 17, de <http://www.bioclimasneotropicales.org/download-mexico.html>
- Delavenne, J.; Metcalfe, K.; Smith, R. J.; Vaz, S.; Martin, C. S.; Dupuis, L.; Coppin, F.; Carpentier, A. (2012). Systema conservation planning in the eastern English Channel: comparing the Marxan and Zonation decision-support tools. *Marine Science*, 69(1), 75-83. doi:10.1093/icesjms/fsr180

- Di Minin, E., Veach, V., Lehtomäki, J., Montesino, F., y Moilanen, A. (2014). A quick introduction to Zonation-2. 1-30. Helsinki: the Conservation Biology Informatics Group, at the University of Helsinki. doi:ISBN978-978-952-10-9922-9
- Dormann, C. F.; Elith, J.; Bacher, S.; Buchmann, C.; Carl, G.; Carré, G.; García, J. R.; Gruber, B.; Lafourcade, B.; Leitão, P. J.; Münkemüller, T.; McClean, C.; Osborne, P. E.; Reineking, B.; Schröder, B.; Skidmore, A. K.; Zurell, D.; Lautenbach, S. (2012). Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, (35), 001-020.
- Drummond, S. P., Wilson, K. A., Meijaard, E., Watts, M., Dennis, R. (2010). Influence of a threatened-species focus on conservation planning. *Conservation Biology*, 24, 441-449.
- Dutilleul, P. (1993). Modifying the t test for Assessing the correlation between two spatial processes, 49, 305-314.
- Escalante, T. (2015). Modelos de distribución de especies de mamíferos y suculentas de la Faja Volcánica Transmexicana. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ciencias.: Informe final SNIB-CONABIO, proyecto No. JM055.México. D.F.
- Escalante, T., Rodríguez, G., y Morrone, J. J. (2005). Las provincias biogeográficas del Componente Mexicano de Montaña desde la perspectiva de los mamíferos continentales. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 76(2), 199-205.
- Escalante, T., Rodríguez, G., Gámez, N., Barrera, O., y Sánchez-cordero, V. (2007). Biogeografía y conservación de los mamíferos. En I. Luna, J. Morrone, y D. Espinosa, *Biodiversidad de la faja volcánica Transmexicana* (págs. 485-502). UNAM, México.
- Escalante, T., Sánchez-Cordero, V., Gámez, Morrone, J.J., y Sánchez-Cordero, M. (2007). Deforestation affects biogeographical regionalization: a case study contrasting potential and extant distributions of Mexican terrestrial mammals. *Journal of Natural History*, (41), 965-984. doi: 10.1080/00222930701292062.

- Esparza-Olguín, L. (2004). ¿Qué sabemos de la rereza en especies vegetales? Un enfoque genético-demográfico. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, (75), 17-32. doi: 10.17129/botsci.1691.
- Espinosa, D., Ocegueda, S., Flores, O., Flores-Villela, O., y Llorente\_Bousquets, J. (2008). El conocimientos biogeográfico de las especies y su regionalización natural. En J. Soberón, G. Halffter, y J. Llorente-Bousquets, *Capital Natural de México: Conocimiento actual de la biodiversidad* (Vol. I, págs. 34-65). Ciudad de México.
- Favreau, J. M., Drew, C. A., Hess, G. R., Rubino, M. J., Koch, F. H., y Eschelbach, K. A. (2006). Recommendations for assessing the effectiveness of surrogate species approaches. *Biodiversity and conservation*, 15(12), 3949-3969. doi:10.1007/s10531-005-2631-1
- Ferrari, L. (2000). Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. *Boletín de la Geologica Mexicana*, LIII(2000), 84-92.
- Flores-Villela, O., Canseco-Márquez, L., y Ochoa-Ochoa, L. M. (2010). Geographi distribution and conservation of the herpetofauna of the highlands of Central Mexico. 302-321.
- Fuller, T. M., Munguía, M., Mayfield, M., Sánchez-Cordero, V., y Sarkar, S. (2006). Incorporating connectivity into conservation planning: A multi-criteria case study from central Mexico. *Biological Conservation*, (133), 131-142.
- Gámez, N., Escalante, T., Rodríguez, G., Linaje, M., y Morrone, J. (2012). Caracterización biogeográfica de la Faja Volcánica Transmexicana y análisis delos patrones de distribución de su mastofauna. *Revista Mexicana de Biodiversidad*(83), 258-272.
- González-Ruíz, N., Ramírez-Pulido, J., y Genoways, H. H. (2009). Geographic distribution, taxonomy, and conservation status of nelson's woodrat (*Neotoma velsoni*) in Mexico. *The Southwestern Naturalist*, 51(1), 112-116.
- Hernández, C. M., y Carrasco, E. G. (2007). Rasgos Climáticos más Importantes. En I. Luna, J. J. Morrone, & D. Espinoza, *Biodiversidad de la Faja Volcánica Transmexicana* (págs. 57-72). UNAM, México.

- Hernández, H., y Gómez-Hinostrosa, C. (2011). *Mapping the cacti of Mexico*. D.F., México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Hernández, H., y Gómez-Hinostrosa, C. (2015). *Mapping the Cacti of Mexico: Part II*. D.F., México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Hijmans, R. J., Leathwick, J., y Elith, J. (2017). *dismo: Species Distribution Modeling, version 1.0*. Recuperado el 1 de enero de 2017, de <https://CRAN.R-project.org/package=dismo/>
- Lamoreux, J. F., Morrison, J. C., Ricketts, T. H., Olson, D. M., Dinerstein, E., McKnight, M. W., y Shugart, H. H. (n.d.). Global tests of biodiversity concordance and the importance of endemism. *Nature*, 440(9), 212-214.
- Lawler, J. J., White, D., Sifneos, J. C., Lawrence, L., y Master, L. (2003). Rare species and the use of indicator groups for conservation planning. *Conservation Biology*, 17(3), 875-882.
- Lehtomäki, J., y Moilanen, A. (2013). Methods and workflow for spatial conservation prioritization using Zonation. *Environmental Modelling & Software*, (47), 128-137.
- Lentini, P. E., y Wintle, B. A. (2015). Spatial conservation priorities are highly sensitive to choice of biodiversity surrogates and species distribution model type. *Ecography*, (38), 1101-1111.
- Hernández, C. M., & Carrasco, E. G. (2007). Rasgos Climáticos más Importantes. En I. Luna, J. J. Morrone, & D. Espinoza, *Biodiversidad de la Faja Volcánica Transmexicana* (págs. 57-72). UNAM, México.
- Hernández, H., & Gómez-Hinostrosa, C. (2011). *Mapping the cacti of Mexico*. D.F., México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Hernández, H., & Gómez-Hinostrosa, C. (2015). *Mapping the Cacti of Mexico: Part II*. D.F., México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.

- Hijmans, R. J., Leathwick, J., & Elith, J. (2017). *dismo: Species Distribution Modeling, version 1.0*. Recuperado el 1 de enero de 2017, de <https://CRAN.R-project.org/package=dismo/>
- Lamoreux, J. F., Morrison, J. C., Ricketts, T. H., Olson, D. M., Dinerstein, E., McKnight, M. W., & Shugart, H. H. (n.d.). Global tests of biodiversity concordance and the importance of endemism. *Nature*, *440*(9), 212-214.
- Lawler, J. J., White, D., Sifneos, J. C., Lawrence, L., & Master, L. (2003). Rare species and the use of indicator groups for conservation planning. *Conservation Biology*, *17*(3), 875-882.
- Lehtomäki, J., & Moilanen, A. (2013). Methods and workflow for spatial conservation prioritization using Zonation. *Environmental Modelling & Software*, *(47)*, 128-137.
- Lentini, P. E., y Wintle, B. A. (2015). Spatial conservation priorities are highly sensitive to choice of biodiversity surrogates and species distribution model type. *Ecography*, *(38)*, 1101-1111.
- Lindenmayer, D. B., y Linkens, G. E. (2011). Direct measurement versus surrogate indicator species for evaluating environmental change and biodiversity loss. *Ecosystems*, *(14)*, 47-59. doi:10.1007/s10021-010-9394-6
- Lindenmayer, D.; Pierson, J.; Barton, P.; Beher, M.; Branquinho, C.; Calhoun, A.; Caro, T.; Greig, H.; Gross, J.; Heino, J.; Hunter, M.; Lane, P.; Longo, C.; Martin, K.; McDowell, W. H.; Mellin, C.; Salo, H.; Tulloch, A.; Westgate, M. (2015). A new framework for selecting environmental surrogate. *Science of the Total Environment*, *(538)*, 1029-1035.
- Luna-Vega, I., Morrone, J. J., y Escalante, T. (2010). Conservation biogeography: A view point from evolutionary biogeography. En M. Gailis, y S. Kalnins, *Biogeography* (págs. 229-240). Nova-Science Publishers. New York, EE.UU.
- Margueles, C. R., y Pressey, R. L. (2000). Systematic conservation planning. *Nature*, *405*, 243-253.

- Margules, C. R., y Sarkar, S. (2009). *Planeación Sistemática de la Conservación* (Primera ed.). (V. Sánchez-Cordero, y F. Figueroa, Trans.) México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Moilanen, A., Franco, A., Early, R. I., Fox, R., Wintle, B., y Thomas, C. D. (2005). Prioritizing multiple-use landscapes for conservation: methods for large multi-species planning problems. *Proc. R. Soc. B*, 272, 1885-1891. doi:10.1098/rspb.2005.3164
- Moilanen, A., Pouzols, F. M., Meller, L., Veach, V., Arponen, A., Leppänen, J., y Kujala, H. (2014). Zonation: Spatial conservation planning methods and software v.4, User manual. Helsinki, C-BiG Conservation Biology Informatics Group, Department of Biosciences, University of Helsinki.
- Molina-Arias, M. (2017) ¿Qué significa realmente el valor p? *Pediatr Aten Primaria*, 19, (76), 377-381. doi: ISSN 1139-7632
- Moore, J. L., Balmford, A., Brooks, T., Burgess, N. D., Hansen, L. A. (2003). Performance of sub-Saharan vertebrates as indicator groups for identifying priority áreas for conservation. *Conservation Biology* (17), 207-218.
- Morales, R., Escalante, T., Noguera-Urbano, E. A., Gámez, N., y Rodríguez-Tapia, G. (2016). Conservation biogeography in the Mexican Mountain Component: bridging conservation and patterns of endemism. *Therya*, 7(2), 215-229. doi:10.12933/therya-16329,ISSN 2007-3364
- Mortiz, C., Richardson K. S., Ferrier, S., Monteith, G. B., Stanisic, J. (2001). Biogeographical concordance and efficiency of taxón indicators for establishing conservation priority in a tropical rainforest biota. *Proceeding of the Royal Society B: Biological Sciences* 268, 1875-1881.
- Morrone, J. J. (2001). *Biogeografía de la América Latina y el Caribe*. D.F., México: Museo de Zoología, Facultad de Ciencias-UNAM.
- Morrone, J. J. (2001b). Homology, biogeography and areas of endemism. *Diversity and Distributions*, 7, 297-300.

- Morrone, J. J. (2005). Hacia una síntesis biogeográfica de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 76(2), 207-252.
- Morrone, J. J., Escalante, T., y Rodríguez-Tapia, G. (2017). Mexican biogeographic provinces: Map and shapefiles. *Zootaxa*, 4277(2), 277-279.
- Muscarella, R., Galante, P. J., Soley-Guardia, M., Boria , R. A., Kass, J. M., Uriarte, M., y Aderson, R. P. (2014). ENMeval: An R package for conducting spatially independent evaluations and estimating optimal model complexity for Maxent ecological niche models. *Methods in Ecology and Evolution*, (5), 1198-1205.
- Navarro-Sigüenza, A. G., Lira-Noriega, A., Peterson, A. T., Oliveras, A., y Gordillo-Martínez, A. (2007). Diversidad, endemismo y conservación de las aves. En I. Luna, J. J. Morrone, y D. Espinosa, *Diversidad de la Faja Volcánica Transmexicana* (pp. 461-483). UNAM, México, D.F.
- Navarro-Sigüenza, A. G., Peterson , A. T., y Gordillo-Martínez, A. (2003). Museums working together: the atlas of the birds of Mexico. (N. Collar, C. Fisher, y C. Feare, Edits.) *Why museums matter: avian archives in an age of extinction. Bulletin British Ornithologist Club Supplement 123A*, 207-225.
- Noguera-Urbano, E. A. (2017). El endemismo: diferenciación del término, métodos y aplicaciones. *Acta Zoológica Mexicana*, 33(1), 89-107. doi:ISSN 0065-1737.
- Ochoa-Ochoa, L. M. y Flores-Villela, O. A. (2017). Base de datos de la Herpetofauna de México. Base de datos espacial en formato shapefile.
- Osorio-Olvera, L., Barve, V., Barve, N., Soberón, J., y Falconi, M. (2018). *Niche ToolBox: desde datos de biodiversidad hasta evaluar modelos de distribución de especies en un entorno GUI amigable. Versión del paquete R 0.2.5.4*. Obtenido de <https://github.com/luismurao/ntbox> .
- Pearson , R. G., Raxworthy, C. J., Nakamura, M., y Townsend, A. P. (2007). Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography*, (34), 102-117.

- Peterson , A. T., Papes, M., y Soberón, J. (2008). Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological Modelling*, (2131), 63-72.
- Peterson, A. T., Navarro-Sigüenza, A. G., y Gordillo-Martínez, A. (2016). The development of ornithology in Mexico and the importance of access to scientific information. *Archives of natural history*, 43(2), 294-304.
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., Dudík , M., Schapire, R. E., y Blair, M. E. (2017). Opening the black box: an open-source release of Maxent. *Ecography*, (40), 887-893.
- Rabinowitz, D. (1981). Seven forms of rarity. En: Synge, H. (ed.), *The biological aspects of rare plant conservation*, John Wiley and Sons, Chichester, pp. 205-217.
- R Core Team. (2017). *R: A language and enviroment for statical computing*. Recuperado el junio 11, 2017, de Foundation for Statistical Computation, Vienna, Austria.: <https://www.R-project.org/>.
- Restrepo, L. R., y González, J. (2007). De Pearson a Spearman. *Revista Colombiana de Ciecniias Pecuarrias*, (20), 183-192.
- Reyes-Castillo, P., y Morón-Ríos, M. A. (2005). Passalidae y Lucanidae (Coleoptera: Scarabaeoidea) de México. Instituto de Ecología A.C.: Bases de datos SNIB-CONABIO proyectos No. AA014 y K005-Passalidae. México, D.F.
- Richard, M. H. (2016). *HH: statistical analysis and data display*. Obtenido de Heiberger and Holland.-R package ver. 3.1-32: <https://www.R-project.org/>.
- Rizo-Aguilar, A., Guerrero, J. A., Hidalgo-Mihart, M. G., y González-Romero, A. (2014). Relationship between the abundance of the Endangered volcano rabbit *Romerolagus diazi* and vegetation structure in the Sierra Chichinautzin mountain range, Mexico. *Fauna & Flora International*, 49(2), 360-365. doi:10.1017/s000306053133000975.
- Rodríguez, A. S., y Brooks, S. L. (2007). Shortcut of biodiversity conservation planning: The effectiveness of surrogates. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. (38), 713-737.

- Soberón, J. (2010). Niche and area of distribution modeling: a population ecology perspective. *Ecography*, 33, 159-167. doi:10.1111/j.1600-0587.2009.06074.x.
- Suárez, M. (2012). Regionalización ambiental y florística y conservación de la Provincia Biogeográfica del Eje Volcánico Transversal de México. (*Tesis inédita de doctorado*). Universidad Nacional Autónoma de México., México.
- Suárez-Mota, M. E., Téllez-Valdés, O., y Martínez Meyer, E. (2014). Dominios climáticos de las Áreas Naturales Protegidas del Eje Volcánico Transversal de México. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, (14), 120-143.
- Suárez-Mota, M., y Téllez-Valdés, O. (2014). Red de áreas prioritarias para la conservación de la biodiversidad del Eje Volcánico Transmexicano analizando su riqueza florística y variabilidad climática. *Polibotánica*, (38), 67-93.
- Team, Q. G. (2017). *Quantum GIS Geographical Information System. Open Source geospatial Foundation Project*. Recuperado el febrero 1, 2017, de <http://qgis.osgeo.org/es/site/>.
- Téllez, O. (n.d.). Distribución potencial de las especies *Pinaceae (Pinus)* y *Fagaceae (Quercus)* de México. Universidad Nacional Autónoma de México. FES Iztacala.: Bases de datos SNIB-CONABIO\_Quercus, proyecto No. JM010. CDMX.
- Torres-Miranda, A., y Luna-Vega, I. (2006). Analisis de trazos para establecer áreas de conservación en la Faja Volcánica Transmexicana. *Interciencia*, 31(12), 849-845. Recuperado el julio 8, 2018, de <https://www.researchgate.net/publication/286518014>.
- UNEP. (2010). Report of the Tenth Meeting of the Conference of the Convention on Biological Diversity. Held in Nagoya, Japan on 18-29 October 2010. UNEP/CBD/COP/10/27
- Urquiza-Haas, T., Koleff, P., Lira-Noriega, A., Kolb, M., y Alarcón, J. (2011) Selección de áreas prioritarias para la conservación de los vertebrados terrestres: ¿es posible usar un grupo como indicador? En: *Planación para la conservación de la biodiversidad terrestre en México: retos en un país megadiverso*. Comisión Nacional para el

Conocimiento y Uso de la Biodiversidad-Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, México; pp. 151-172.

Urquiza-Haas, T., Tobón, W., Kolb, M., Lira-Noriega, A., Contreras, V., Alarcón, J., y Koleff, P. (2019) Assessing best practice for selecting surrogates and target-setting methods in a megadiverse country. *Animal Biodiversity and Conservation*. 42 (1), 187-202 Doi: 10.32800/abc2019.42.0187.

Vallejos, R., Osorio, F., y Bevilacqua, M. (2018). Spatial relationships between two georeferenced variables: with applications in R. New York: Springer.

Venables, W. N., y Ripley, B. D. (2002). Modern applied statistics with S Fourth Edition New York: Springer.

Vite-Silva, V., Ramírez-Bautista, A., y Hernández-Salinas, U. (2010). Diversidad de anfibios y reptiles de la Reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán, Hidalgo, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, (80), 473-485.

Yarza de la Torre, E. (2003). Los volcanes del Sistema Volcánico Transversal. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, (50), 220-234.