

# ANÁLISIS DE TRAZOS PARA ESTABLECER ÁREAS DE CONSERVACIÓN EN LA FAJA VOLCÁNICA TRANSMEXICANA

ANDRÉS TORRES MIRANDA  
e ISOLDA LUNA VEGA

## RESUMEN

La Faja Volcánica Transmexicana es reconocida como una provincia, basada en rasgos geológicos, tectónicos, geomorfológicos y biogeográficos. La Faja es un arco volcánico que se extiende desde las costas del Pacífico en los estados de Jalisco y Nayarit hasta las costas del Golfo de México en Veracruz. La formación de esta provincia comenzó en el Mioceno medio, con un último episodio en el Plioceno tardío-Cuaternario donde se formaron la mayor parte de los complejos volcánicos actuales. Se realizó un análisis de trazos con 136 organismos (aves, mamíferos, reptiles, helechos y encinos) presentes en la Faja, encontrándose 8 trazos generalizados y 15 nodos; 6 de estos últimos se encuentran en la región de las

Cuencas de Toluca-México-Puebla. Varios de los nodos encontrados en este trabajo ya habían sido reportados en trabajos previos, y muchos de ellos tienen correspondencia con Regiones Terrestres Prioritarias y Áreas de Importancia para la Conservación de las Aves. Mediante un análisis de complementariedad se proponen cuatro áreas prioritarias para la conservación de ecosistemas y especies, siguiendo el criterio de conservar el menor número de áreas que alberguen el mayor número de especies. Estas áreas son, en orden de importancia: corredor Valle de México-Sierra de Chichinautzín-Sierra Nevada, corredor Cofre de Perote-Cañón de Río Blanco, nodo Volcán de San Juan y nodo Pátzcuaro.

Loizat (1958) propuso a la panbiogeografía como una herramienta para la comprensión de la historia biológica dentro de un contexto espacio-temporal. Este autor estableció que los patrones de distribución de las biotas son altamente repetitivos, por lo que de esta forma se podrían encontrar patrones similares en la distribución de taxones de alta vagilidad y en taxones altamente filopátridos. El análisis de trazos consiste en la localización en un mapa de los registros puntuales de distribución de una especie y unirlos mediante líneas de tendido mínimo (menor distancia entre los puntos), a los que se denomina trazo individual. Después se identifica la extensión donde dos o más trazos individuales coinciden y se delimitan los trazos generalizados. Las zonas donde se intersectan dos o más trazos generalizados reciben el nombre de nodos, los cuales corresponden a lo que Morrone (2001a) denominó como

la superposición en espacio-tiempo de diferentes fragmentos geobióticos ancestrales (Figura 1). Grehan (1993) y Craw *et al.* (1999) utilizaron el método panbiogeográfico para delimitar áreas cuya finalidad es la conservación de los recursos biológicos, considerando que las áreas donde se encuentran los nodos son zonas con alta prioridad para la conservación, debido a que representan áreas biológica y geológicamente complejas.

El reconocimiento de endemismos y rasgos geomorfológicos, así como evidencias geológicas, tectónicas y climáticas comunes a ciertas extensiones, que las diferencian de otras regiones, han propiciado la regionalización del territorio mexicano en provincias bióticas (Morrone, 2001b). De esta forma, la región central de México ha sido identificada como la provincia de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), tanto por sus características bióticas (Morrone, 2005), geológicas

(Gómez-Tuena *et al.*, 2005) como geomorfológicas (Lugo-Hubp, 1990).

La FVTM posee 80 a 230km de ancho y más de 1000km de longitud, cuyas coordenadas extremas son al norte 21°38'24", al sur 18°23'24", al este -96°22'12" y al oeste -105°45' (Figura 2). Esta provincia se extiende desde las costas del Pacífico, en los estados de Nayarit (San Blas) y Jalisco (Bahía de Banderas), hasta las costas del Golfo de México, en Palma Sola, en el estado de Veracruz (Gómez-Tuena *et al.*, 2005). La FVTM a menudo es reconocida como un complejo de arcos volcánicos continentales (Nixon *et al.*, 1987; Alaniz-Álvarez *et al.*, 1998; Ferrari, 2000; Ego y Ansen, 2002; García-Palomo *et al.*, 2002; Szyrkaruk *et al.*, 2004), los cuales han sido asociados a la subducción de las Placas de Cocos y de Rivera, a lo largo de la Trinchera Centroamericana.

Desde el comienzo de su formación, la historia geológica de la

**PALABRAS CLAVE / Análisis de Trazos / Complementariedad / Conservación / Faja Volcánica Transmexicana /**

Recibido: 01/09/2006. Modificado: 31/10/2006. Aceptado: 13/11/2006.

Andrés Torres Miranda. **Biólogo, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México. Estudiante de Maestría de la UNAM, México.**

Isolda Luna Vega. **Doctora en Ciencias, UNAM, México. Profesora, UNAM, México. Dirección: Departamento de Biología Evolutiva, Facultad de Ciencias, UNAM. Apartado Postal 70-399, Ciudad Universitaria, C. P. 04510, México, DF. México. e-mail: ilv@hp.fcencias.unam.mx**

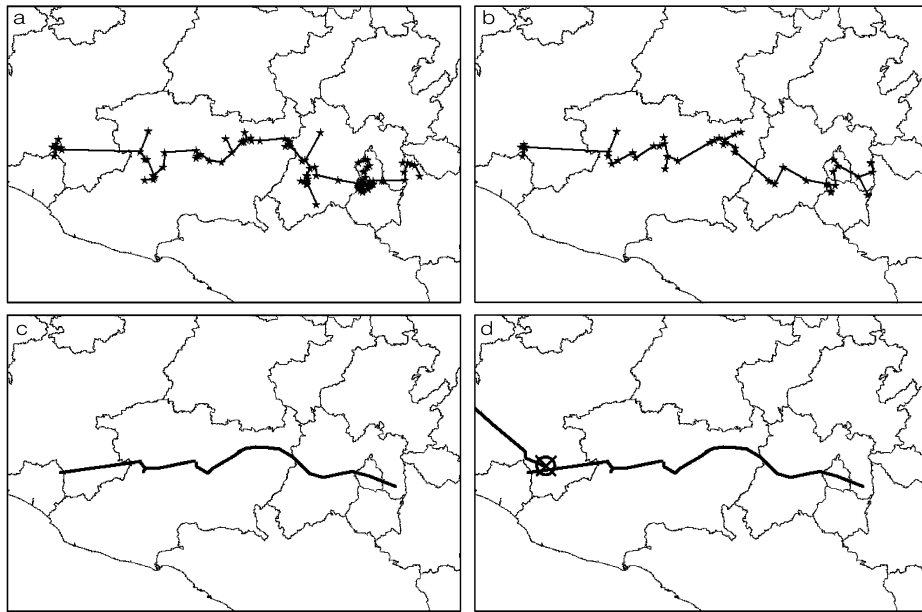


Figura 1. a y b: Trazos individuales de dos taxones hipotéticos (las localidades están unidas mediante líneas de tendido mínimo), c: trazo generalizado en zonas donde se sobreponen dos o más trazos individuales, y d: nodo panbiogeográfico donde se intersectan dos trazos generalizados.

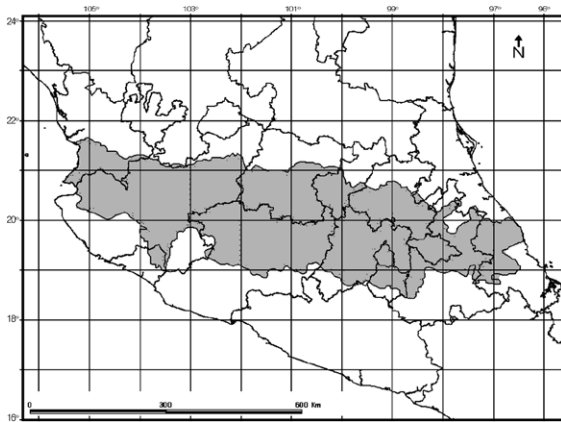


Figura 2. Localización de la Faja Volcánica Transmexicana según Gómez-Tuena *et al.* (2005).

Faja, según Gómez-Tuena *et al.* (2005), se puede dividir en cuatro episodios: 1) arco intermedio en el Mioceno medio y tardío; 2) episodio máfico del Mioceno tardío; 3) episodio silíceo al final del Mioceno y vulcanismo bimodal del Plioceno temprano; y 4) arco del Plioceno tardío-Cuaternario, periodo en que se forma el Complejo volcánico de Colima, Tequila (Jalisco), Ceboruco, Sangangüey, Las Navajas y San Juan (Nayarit), así como el campo volcánico Michoacán-Guanajuato, la Sierra del Chichinautzin y Apan, la Sierra Nevada (Cerro Tláloc, Iztaccíhuatl y Popocatepetl) y más al oriente el volcán La Malinche y el alineamiento del Pico de Orizaba-Cofre de Perote.

Pocos han sido los intentos de conservación que se han hecho para la FVTM. Ceballos y Navarro (1991) señalaron la importancia de la FVTM como áreas ricas en endemismos de mamíferos y

recalaron que la expansión de las actividades humanas es uno de los principales problemas del deterioro del ambiente donde habitan estos organismos. Según Fa y Morales (1991), hasta esa fecha existían 26 zonas protegidas que cubrían 378834ha dentro de la FVTM. Hoy en día, existen 43 áreas Naturales Protegidas (ANP) a lo largo de la extensión de la FVTM. Además, existen 23 Regiones Terrestres Prioritarias (RTP), las cuales son áreas ambientalmente estables que destacan por su riqueza ecosistémica y específica, así como

por la presencia de especies endémicas con oportunidades reales de conservación (Espinoza-Rodríguez, 2000) y 29 Áreas de Importancia para la Conservación de Aves (AICAS), que son zonas donde se encuentran aves en peligro de extinción, con distribución restringida o bien donde existen grandes congregaciones de individuos (Benítez *et al.*, 1999).

El objetivo de este trabajo fue llevar a cabo un análisis de trazos e identificar los nodos panbiogeográficos presentes en la FVTM, y con base en ellos proponer áreas prioritarias para la conservación de especies y ecosistemas, bajo el supuesto de que las áreas nodales son biológica y geológicamente complejas, por lo que son áreas de importancia histórica en la evolución de la biota general del área. Mediante un análisis de complementariedad se priorizaron las áreas importantes a conservar.

## Métodos

Se seleccionaron 156 especies pertenecientes a cinco grupos diferentes: 27 especies de aves, 28 mamíferos, 25 reptiles, 50 helechos (*sensu lato*) y 25 encinos, cuya área de distribución incluyera la FVTM. La selección de los grupos se basó en los siguientes criterios: a) se eligieron taxones con diferentes grados de vagilidad y tipos de dispersión, b) que fueran taxones con origen espacio-temporal diferente, y c) taxones con diferentes historias filogenéticas.

A partir de la información recopilada en la consulta a herbarios y colecciones zoológicas, se construyeron bases de datos por especie en Access 2003, las cuales incluyen nombre de la especie y georreferencia. Para el caso de los ejemplares que no tenían georreferencia, ésta se obtuvo mediante el uso del gacetero de localidades del INEGI (2002), de cartas topográficas del área de estudio escala 1:250000 y del programa GEOLocate v.2.03 (Ríos y Bart, 2004). De esta forma se elaboró una base de datos con más de 18000 registros georreferidos.

Las bases de datos fueron exportadas a formato DBaseIII, para poder ser visualizadas mediante el Sistema de Información Geográfica ArcView 3.2 (ESRI, 1999), en el cual se visualizaron los archivos, con el uso de los mapas de CONABIO (2003a, b). Se construyó un polígono en formato Shapefile (shp) sobre el área que propone Gómez-Tuena *et al.* (2005) para la FVTM, con lo cual se intersectaron las localidades puntuales de distribución de cada especie, generando así 156 nuevos archivos, de los que fueron eliminados los registros de tres especies cuya área de distribución no coincide con la FVTM, así como los registros de nueve especies que tenían datos solamente de un lugar de colecta y ocho especies (siete helechos y un encino) con determinación taxonómica dudosa. Con ello, quedaron los registros de 136 especies.

Una vez obtenidas las localidades puntuales de las 136 especies, se llevó a cabo la obtención de trazos individuales, utilizando el programa *Trazos2004* (Rojas, 2004). Este algoritmo construye los trazos individuales eliminando los registros repetidos y generando un nuevo archivo con localidades únicas de las especies, uniendo estos puntos mediante el principio de distancia mínima y generando un trazo individual en formato shp. Los trazos individuales se imprimieron en hojas de papel albanene para facilitar la obtención de trazos generalizados.

Los trazos generalizados se obtuvieron al sobreponer los 136 trazos individuales de las especies, y se trazaron en donde convergen tres o más trazos individuales, con base en el método manual

(Croizat, 1958; Craw *et al.*, 1999; Grehan, 2001; Morrone, 2004). Los trazos generalizados se representaron con líneas de mayor grosor que los utilizados para los trazos individuales, y se digitalizaron mediante el empleo de ArcView 3.2 (ESRI, 1999).

Una vez delimitados los trazos generalizados, se determinaron los nodos, en los lugares donde convergen dos o más trazos generalizados. Los nodos se representaron por medio del símbolo ⊗ y también fueron digitalizados con el uso de ArcView 3.2 (ESRI, 1999).

Para cumplir con el último objetivo del trabajo se realizó un análisis de complementariedad. Dicho análisis se utilizó para clasificar a los nodos en orden prioritario para su conservación, ya que considera áreas que posean la mayor diversidad biológica (Vane-Wright *et al.*, 1991, Arita y Rodríguez, 2001; Sánchez Cordero *et al.*, 2001, 2005).

Humphries *et al.* (1991) señalaron que la complementariedad consiste en elegir dos áreas que, en conjunto, mantengan la mayor diversidad biológica posible. La primera tiene la mayor riqueza de especies y la segunda el mayor número de especies adicionales, es decir especies que no se encuentran en el primer nodo seleccionado, ya que el valor de complementariedad de un par de áreas se da por las especies no compartidas entre ambas áreas (García-Marmolejo, 2003).

Para establecer prioridades entre los nodos, basados en el principio de máxima diversidad biológica, se empleó el complemento residual, que representa la diferencia entre el número total de taxones analizados y el número de taxones presentes en un nodo.

Para establecer el número mínimo de áreas requeridas, que representa el porcentaje total de especies analizadas, se

empleó la porción complementaria acumulada, determinada por la suma del porcentaje de especies adicionales de cada nodo elegido. Siguiendo el esquema de Vane-Wright *et al.* (1991), se escogió el nodo cuyo complemento residual fuera el menor; posteriormente se eligió el siguiente nodo que contara con el mayor número de especies no compartidas, continuando con el mismo criterio hasta tener representadas el total de especies utilizadas en las áreas elegidas.

Por otra parte, Coldwell y Coddington (1994) proponen un índice de complementariedad que permite cuantificar las especies compartidas en dos áreas mediante la fórmula

$$ICC = (a+b-2j) / (a+b-j)$$

donde a: número de especies en el área 1, b: número de especies en el área 2, y j: número de especies compartidas entre ambas áreas.

El valor de complementariedad varía de 0 a 1, donde 0 indica coincidencia total en el número de especies que integran cada par de nodos, mientras que cuando el valor es 1, hay complementariedad total y por ello no se comparte ninguna especie entre los dos nodos. El porcentaje de especies complementarias para cada par de nodos es  $ICC \times 100$  (García-Marmolejo, 2003).

## Resultados

Se obtuvieron 136 trazos individuales, de los cuales 45 fueron de helechos, 25 de encinos, 26 de mamíferos, 27 de aves y 13 de reptiles. Para su análisis se dividieron en los siguientes patrones genera-

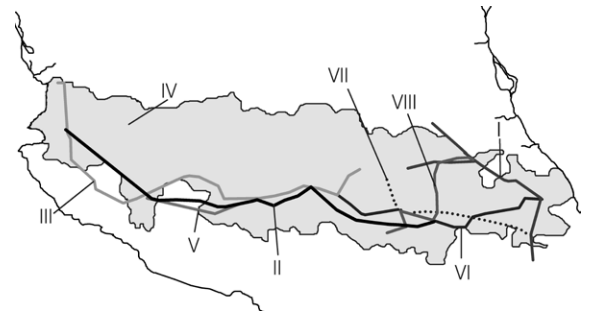


Figura 3. Ubicación de los ocho trazos generalizados obtenidos.

les: a) trazos cuya longitud abarca toda la FVTM, b) trazos de la parte occidental, c) trazos de la parte central y, d) trazos de la parte oriental.

Se obtuvieron ocho trazos generalizados basados en el solapamiento de tres o más trazos individuales (Figura 3). En la Tabla I se listan las especies que justifican los trazos generalizados.

**Trazo generalizado I.** Se extiende desde el centro de Veracruz desde el Cañón de Río Blanco y el Pico de Orizaba hasta el Cofre de Perote, se dirige hacia el noroeste de Puebla, atravesando la región de Cuetzalán y llegando a la Cuenca del Río Necaxa, hacia el suroeste se extiende hasta el norte del Estado de México en Tequixquiac, ramificándose hacia el suroeste hasta llegar al límite del Estado de México con Hidalgo (al sur de Pachuca) y por otra parte hacia el sureste hasta llegar a las Barrancas de Metztlán en el estado de Hidalgo.

**Trazo generalizado II.** Se extiende desde San Sebastián del Oeste, al noroeste de Jalisco hasta el Nevado de Colima, prolongándose hacia el noreste y atravesando la parte central de Michoacán a lo largo de Tancítaro, Pátzcuaro y la Sierra de Chincua; llega al Estado de México hacia el Nevado

TABLA I  
ESPECIES QUE APOYAN LOS TRAZOS GENERALIZADOS ENCONTRADOS

Trazo	Especies
I	<i>Argyrochosma formosa</i> , <i>Basileuterus rufifrons</i> , <i>Myadestes occidentalis</i> , <i>Elaphoglossum vestitum</i> , <i>Geophis mutitorques</i> , <i>Polypodium hallbergii</i> , <i>P. subpetiolatum</i> , <i>Quercus acherdophylla</i> , <i>Q. acutifolia</i> , <i>Q. affinis</i> , <i>Q. conspersa</i> , <i>Q. depressa</i> , <i>Q. glabrescens</i> , <i>Q. laurina</i> , <i>Woodwardia spinulosa</i> .
II	<i>Atlapetes pileatus</i> , <i>Basileuterus rufifrons</i> , <i>Buarremon virenticeps</i> , <i>Campylorhynchus megalopterus</i> , <i>Cyanocitta stelleri</i> , <i>Empidonax affinis</i> , <i>Ergaticus ruber</i> , <i>Peromyscus aztecus</i> , <i>Pipilo ocai</i> , <i>Ptilogonys cinereus</i> , <i>Quercus conspersa</i> , <i>Sceloporus aeneus</i> , <i>Sitta carolinensis</i> , <i>Trogon mexicanus</i> .
III	<i>Adiantum andicola</i> , <i>Asplenium hallbergii</i> , <i>Cheilanthes lendigera</i> , <i>Dryopteris rossii</i> , <i>Phanerophlebia nobilis</i> , <i>Quercus acutifolia</i> , <i>Q. crassipes</i> , <i>Q. laeta</i> , <i>Q. magnoliifolia</i> , <i>Q. martinezii</i> , <i>Q. obtusata</i> .
IV	<i>Adiantum braunii</i> , <i>A. concinnum</i> , <i>Campylorhynchus gularis</i> , <i>Polypodium madrense</i> , <i>P. subpetiolatum</i> , <i>Quercus acherdophylla</i> , <i>Selaginella pallescens</i> .
V	<i>Atthis heloisa</i> , <i>Catharus occidentalis</i> , <i>Parula superciliosa</i> , <i>Polypodium martensii</i> , <i>P. rosei</i> , <i>Polystichium speciosissimum</i> , <i>Woodwardia spinulosa</i> .
VI	<i>Elaphoglossum glaucum</i> , <i>E. sartorioi</i> , <i>Neotoma nelsoni</i> , <i>Peromyscus bullatus</i> , <i>Polypodium hartwegianum</i> , <i>Quercus diversifolia</i> , <i>Q. dysophylla</i> , <i>Q. frutex</i> , <i>Spermophilus perotensis</i> .
VII	<i>Adiantum andicola</i> , <i>Crotalus ravus</i> , <i>Elaphoglossum affine</i> , <i>Geothlypis speciosa</i> , <i>Lampornis clemenciae</i> , <i>Phanerophlebia nobilis</i> , <i>Polypodium madrense</i> , <i>P. martensii</i> , <i>Reithrodontomys chrysopsis</i> , <i>Scelasporus bicanthalis</i> , <i>Sigmodon leucotis</i> , <i>Sitta carolinensis</i> , <i>Thamnophis scalaris</i> .
VIII	<i>Cheilanthes cuneata</i> , <i>Ch. lendigera</i> , <i>Elaphoglossum gratum</i> , <i>Romerolagus diazii</i> , <i>Quercus laurina</i> .

de Toluca y se continua hasta las inmediaciones de la parte oeste del Iztaccíhuatl-Popocatepetl, después de atravesar la Sierra de Chichinautzin.

*Trazo generalizado III.* Se origina en la región del volcán de San Juan en el estado de Nayarit hacia el sur del estado de Jalisco, pasando por Talpa de Allende, Autlán y al este hasta Zapotlán, donde toma una dirección noreste atravesando el Nevado de Colima hasta llegar a Quitupan (Jalisco), desde donde se dirige al este atravesando Tancítaro hacia Queréndaro-Zinapécuaro-Anganguo, hasta llegar a los límites del Estado de México y Querétaro, en Amealco.

*Trazo generalizado IV.* Este trazo también se origina en la zona aledaña al Volcán de San Juan (Nayarit), pero se continúa con una dirección sureste atravesando los municipios de Santa María del Oro e Ixtlán del Río (Nayarit), hasta la región de Tequila (Jalisco) y dirigiéndose hacia Tala y Tlajomulco (Jalisco), y terminando hacia la región norte del Nevado de Colima.

*Trazo generalizado V.* Este trazo tiene su origen en la vertiente sureste del Nevado de Colima, con una dirección este hasta llegar a Tancítaro donde se extiende un poco más al norte a los alrededores de Uruapan (Michoacán).

*Trazo generalizado VI.* Inicia en los límites del estado de Michoacán, en el municipio de Anganguo, y se extiende hacia el sureste, al norte del Nevado de Toluca, en los municipios de Villa Victoria y Amanalco. De ahí se extiende hacia el este hasta llegar a Huixquilucan y hasta las inmediaciones del Ajusco, y con un ángulo ligeramente hacia el sur; llega hasta la Sierra Nevada, en los límites del Estado de México y Puebla, y de ahí llega hasta el volcán La Malinche donde toma un ángulo hacia el norte, hasta la región del Cofre de Perote en Veracruz.

*Trazo generalizado VII.* Este trazo comienza en la parte norte del Cañón de Río Blanco, en el estado de Veracruz, y toma una dirección noroeste hasta llegar a la región de Sierra Nevada en los límites de los estados de México y Puebla, continuando con una dirección oeste hasta la región cercana al Ajusco, en el Distrito Federal, y siguiendo hacia el norte hasta llegar a la Sierra de Alcaparrosa en el extremo norte del Estado de México.

*Trazo generalizado VIII.* Parte en el norte de la Sierra de Chichinautzin en el estado de Morelos y se prolonga atravesando el parque Iztaccíhuatl-Popocatepetl, extendiéndose al norte hacia Otumba y lle-

TABLA II  
TAXONES Y TRAZOS GENERALIZADOS INVOLUCRADOS EN CADA NODO\*

Nodo	Nombre	Número de especies	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	Volcán de San Juan	35			X	X				
2	Sierra Río Ameca	22		X	X					
3	Nevado de Colima	49		X	X	X	X			
4	Tancítaro	51		X	X		X			
5	Pátzcuaro	53		X	X					
6	Cuitzeo	55		X	X					
7	Sierra Chincua	40			X			X		
8	Sierra Chichinautzin	88		X						X
9	Sur del Valle de México	72						X	X	X
10	Sierra Nevada	76		X				X	X	X
11	El Chico	49	X							X
12	Cuenca Río Necaxa	41	X							X
13	La Malinche	32						X	X	
14	Cofre de Perote	70	X					X		
15	Cañón Río Blanco	46	X						X	

\* Se presenta el número de especies involucradas y los trazos generalizados que intervienen en cada uno de los nodos.

TABLE III  
PRIORIDAD PARA LA CONSERVACIÓN DE LOS NODOS PANBIOGEOGRÁFICOS DE ACUERDO CON LAS DIFERENTES HERRAMIENTAS APLICADAS

Herramientas para establecer prioridad		
Complementariedad de Humphries <i>et al.</i> (1991)		IC de Coldwell y Coddington (1994)
Complemento residual (*)	Porcentaje acumulativo (**)	
8 (38)	8 (69,84)	1 y 13
10 (50)	14 (83,33)	2 y 7
9 (54)	1 (90,48)	2 y 11
14 (56)	11 (95,24)	2 y 13
6 (71)	13 ó 15 (96,83)	2 y 8
5 (73)	2 (97,62)	2 y 9
4 (75)	7 (98,41)	2 y 14
11 y 3 (77)	9 ó 10 (99,21)	1 y 11
15 (80)	3 ó 4 (100)	2 y 10
		1 y 9
		1 y 12
		1 y 15
		2 y 12
		1 y 10
		6 y 13

\* Complemento residual (Humphries *et al.*, 1991), que se obtiene a partir de la diferencia entre el complemento total= 126 (total de especies en nodos) y el número de especies presentes en cada nodo, el cual se presenta en la tercera columna de la Tabla II.

\*\* Porcentaje de especies adicionales por nodo; es decir, aquellas especies que no se encuentran representadas en el nodo anterior. Los números fuera de los paréntesis corresponden a los nodos involucrados.

TABLE IV  
VALORES OBTENIDOS POR PARES DE NODOS APLICANDO EL ÍNDICE DE COMPLEMENTARIEDAD DE COLDWELL Y CODDINGTON (1994)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		0,674	0,667	0,656	0,646	0,732	0,75	0,745	0,811	0,793	0,833	0,813	0,902	0,793	0,809
2			0,709	0,719	0,707	0,738	0,852	0,842	0,84	0,833	0,855	0,811	0,851	0,835	0,786
3				0,529	0,431	0,535	0,609	0,529	0,529	0,529	0,529	0,529	0,529	0,529	0,529
4					0,448	0,528	0,621	0,537	0,602	0,573	0,684	0,667	0,742	0,625	0,671
5						0,435	0,591	0,5	0,547	0,534	0,658	0,763	0,75	0,57	0,625
6							0,468	0,479	0,523	0,494	0,424	0,72	0,792	0,58	0,653
7								0,609	0,6	0,602	0,631	0,773	0,737	0,675	0,716
8									0,351	0,309	0,616	0,723	0,723	0,523	0,66
9										0,259	0,506	0,671	0,667	0,505	0,659
10											0,529	0,64	0,683	0,43	0,614
11												0,548	0,672	0,726	0,549
12													0,741	0,577	0,574
13														0,725	0,742
14															0,453
15															

gando al estado de Hidalgo, en los municipios de Pachuca y Mineral del Chico.

Se identificaron 15 nodos en diez estados dentro de la Faja Volcánica Transmexicana: uno en Nayarit, dos en Jalisco, cuatro en Michoacán, dos en los límites del Estado de México, Distrito Federal y Morelos, uno más en los límites del Estado de México y Puebla, uno en Hidalgo, uno en

Tlaxcala, uno en Puebla y dos en Veracruz. El número máximo de trazos que convergen en un nodo es de cuatro en la Sierra Nevada que se localiza entre los estados de México y Puebla y, en el Nevado de Colima, lo que se aprecia en la Tabla II, donde se muestra también el número de especies presentes en cada nodo.

Se realizó un análisis de complementariedad en el sentido de Humphries *et al.* (1991) en base al complemento residual y el porcentaje acumulativo de especies presentes en los nodos. Se consideró un complemento total de 126, debido a que diez de las 136 especies de este estudio no están presentes en alguno de los nodos.

En la primera columna de la Tabla III se muestra el orden de prioridad de los nodos en base a su complemento residual (CR), es decir la diferencia entre el complemento total (especies que intervienen en alguno de los 15 nodos) y el total de especies por nodo. Se puede observar que el nodo Sierra de Chichinautzin (nodo 8) es el que presenta un mayor número de especies (88) y, por tanto, el menor complemento residual (38), seguido por el nodo Sierra Nevada (nodo 10; 76 especies y CR 50), el nodo Sur del Valle de México (72 especies y CR 54) y el nodo Cofre de Perote (70 especies y CR 56).

Por otro lado, los nodos cuyo complemento residual resulta más alto son: nodo Sierra Río Ameca (22 especies y CR 104), nodo Malinche (32 especies presentes y CR 94) y el nodo Volcán de San Juan (con un CR de 91 y 35 especies presentes).

En la segunda columna de la Tabla III se muestra el porcentaje acumulativo de especies en cada nodo, donde el número entre paréntesis corresponde al porcentaje de especies a conservar. Nótese que con tan sólo tres nodos (Sierra de Chichinautzin, Cofre de Perote y Volcán San Juan) es posible conservar el 90% de las 126 especies contempladas en este análisis. Sin embargo, los nodos Sierra Nevada y Sierra Chincua contienen especies endémicas a México de distribución restringida.

Por otra parte, se obtuvo el IC de Coldwell y Coddington (1994) para cada par de nodos (Tabla IV), encontrándose cuatro de ellos con  $IC > 0,85$ , lo que indica cuatro pares de áreas casi complementarias, que no comparten un gran número de especies. La mayor riqueza de especies que se conservaría en estos pares de nodos es de 92 y la mínima de 52. También hay nueve pares de nodos cuyo IC es de 0,8 a 0,84, donde el número máximo de especies a conservar sería de 95, además de otros cuatro pares con IC menor a 0,8, pero superior a 0,76. Por último, existen nueve pares de nodos en los que existe una riqueza específica superior a 95 especies.

En la tercera columna de la Tabla III se listan los nodos a conservar según el índice de complementariedad de Coldwell y Coddington (1994). Según este índice, los nodos prioritarios son Volcán San Juan, Malinche, Sierra Río Ameca, Sierra Chincua y El Chico. Es obvio que los pares de nodos que concentran el mayor número de especies están relacionadas con el nodo Sierra Chichinautzin y Cofre de Perote.

## Discusión y Conclusiones

La panbiogeografía es una metodología que permite integrar los patrones de distribución de los seres vivos con su pasado geológico, bajo la premisa de Croizat (1958) que menciona que “la vida y la Tierra evolucionan juntas”. La presencia de una barrera geográfica en un tiempo geológico mayor puede ser la causa de la especiación por vicarianza. La vicarianza es el fenómeno del que parte la biogeografía histórica para explicar la distribución de los seres vivos.

### Zonas de convergencia

Los trazos generalizados u homologías biogeográficas primarias (Morrone, 2004) sugieren historias comunes en la composición de sus biotas. Los nodos, al ser áreas de intersección de trazos generalizados, son centros donde están presentes componentes bióticos de distintas afinidades y, representan zonas de contacto de dos o más placas tectónicas. La importancia de estos nodos radica en la riqueza de especies así como en su origen espacio-temporal (Contreras-Medina y Eliosa-León, 2001; García-Marmolejo, 2003; Escalante *et al.* 2004; Morrone, 2004; Trujano, 2004).

En este estudio se obtuvieron 15 nodos, dos en el distrito Occidental, tres en el Campo Volcánico de Michoacán, seis en las Cuencas Toluca-México-Puebla, dos más en el distrito Oriental Veracruzano, uno en los límites de la zona occidental y el Campo Volcánico (Graben de Colima) y otro en los límites del Campo Volcánico Michoacano y el distrito de las Cuencas centrales. Esta disposición coincide con los centros de vulcanismo silíceo del Cuaternario, de los más recientes geológicamente.

### Prioridades para la conservación de ecosistemas y especies

Considerando que un criterio de conservación tomaría el menor número de áreas y el mayor número de especies (Sutherland, 2000), se requiere decidir cuál o cuáles deben tener prioridad para la conservación de sus ecosistemas y especies. Por ejemplo, Álvarez y Morrone (2004) llevaron a cabo un análisis de trazos de aves

de México, utilizando índices de complementariedad para priorizar la conservación de los nodos que encontraron.

Basados en los análisis de complemento residual y porcentaje acumulativo, se puede observar claramente que los nodos Sierra Chichinautzin, Volcán de San Juan y Cofre de Perote son tres de los nodos prioritarios. Aunque estos análisis también señalan como prioritarios los nodos Sur del Valle de México y Sierra Nevada, si analizamos el IC de Coldwell y Coddington (1994), estos dos nodos son muy similares en composición de especies al nodo Sierra Chichinautzin.

Estas áreas han sido identificadas también como Regiones Terrestres Prioritarias y como Áreas de Importancia en la Conservación de Aves, además que han sido identificados como zonas nodales en los trabajos de Álvarez y Morrone (2004) y Escalante *et al.* (2004). Es importante el hecho que estas zonas presentan áreas decretadas como protegidas a nivel federal; sin embargo, no existe conectividad entre ellas, tal como lo proponen Sánchez-Cordero *et al.* (2001, 2005) y Munguía (2004). Estos autores mencionan que los corredores pueden contribuir a la conservación de la diversidad biológica, basados en modelos predictivos para mamíferos.

Los nodos Cofre de Perote y Volcán de San Juan son de gran importancia biológica, ya que junto con el nodo Chichinautzin protegen a más del 90% de especies presentes en algún nodo. Pese a que existe el Parque Nacional en Cofre de Perote, este solo protege una pequeña área alrededor de este volcán, a pesar de que al este de esta región hay una zona importante de manchones de bosque mesófilo. El sistema de las RTP establece un corredor entre esta zona y el Pico de Orizaba, lo cual tendría un efecto positivo en la conservación de los bosques mesófilos, debido al alto número de especies que albergan estos ecosistemas (Rzedowski, 1978). El corredor podría prolongarse hasta el norte de la Sierra de Zongolica, donde se agrupa otro nodo y que corresponde al límite del archipiélago mesófilo.

Considerando el IC de Coldwell y Coddington (1994), es claro que los nodos con mayor prioridad de conservación son Volcán de San Juan, Sierra Río Ameca, Malinche y El Chico, debido a que no comparten muchas especies con otros nodos.

Dos trabajos biogeográficos anteriores han coincidido en el nodo de Pátzcuaro (García Marmolejo, 2003; Escalante *et al.*, 2004), que también coincide con un AICA y que, sin embargo, es un área que no tiene prioridad de conservación. Una zona aledaña a ésta, Tacámbaro, también ha sido identificada como un AICA, pero

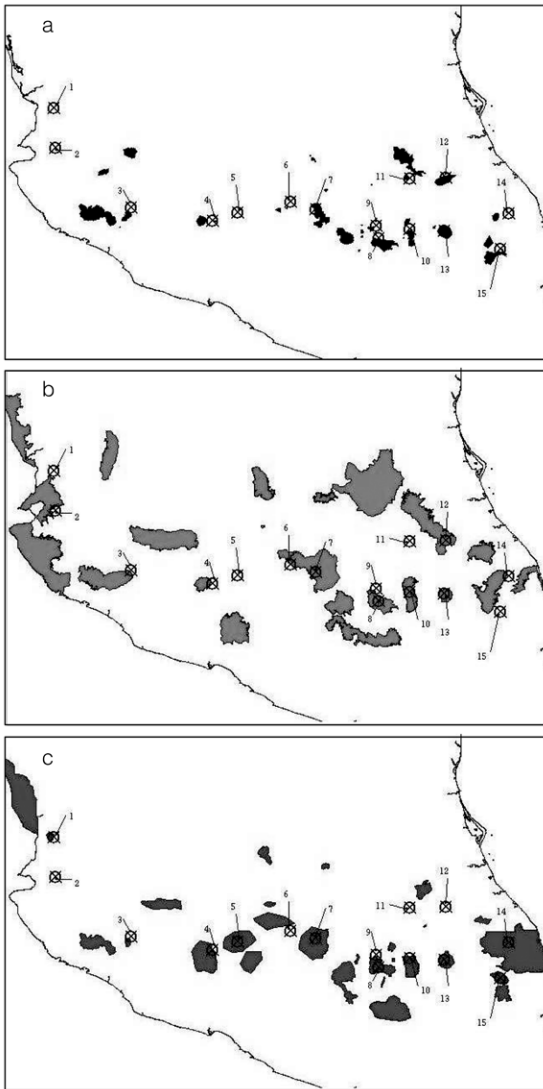


Figura 4. a: superposición de nodos con Áreas Naturales Protegidas con decreto federal en México (CONANP, 2005); b: superposición de nodos con Regiones Terrestres Prioritarias (CONABIO, 2000); c: superposición de nodos con Áreas de Importancia para la Conservación de Aves (CIPAMEX-CONABIO, 1999).

ninguna de las dos ha sido declarada como área prioritaria.

Afortunadamente no todos los casos son de este tipo, ya que el nodo Tancitaro es un Parque Nacional Federal protegido, en un área donde convergen tanto un AICA como una RTP. La Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca, que abarca el conjunto de la Sierra Chincua, es un "corredor" que une el nodo Cuitzeo y el nodo Chincua. De igual manera sucede con los nodos de Hidalgo que presentan áreas decretadas de protección federal.

Por lo tanto, se proponen como áreas prioritarias para su conservación a las siguientes zonas: a) corredor que una los nodos Chichinautzin, Sur del Valle de México y Sierra Nevada, como también lo proponen Munguía (2004) y Sánchez-Cordero *et al.* (2005); b) corredor que una los nodos

Cofre de Perote y Cañón de Río Blanco, que permitiría conservar un gran número de manchones de bosques mesófilos de montaña; c) Volcán de San Juan, que alberga el mayor número de especies de los tres nodos del occidente de la FVTM y que además tiene un gran porcentaje de especies complementarias en relación a nodos de otros distritos de la misma; y d) Pátzcuaro, ya que es reconocida como prioritaria con base en otras metodologías, como RTP y AICA, además de haber sido detectada como un nodo para los mamíferos neotropicales.

Además de la correspondencia que guardan las zonas nodales encontradas en este trabajo con trabajos anteriores realizados con otros grupos de organismos, la propuesta de los dos corredores de este trabajo coincide con la efectuada por Munguía (2004) y por Sánchez-Cordero *et al.* (2005) en base a distribuciones potenciales de mamíferos terrestres presentes en la FVTM, además de corroborar lo dicho por Ceballos y Navarro (1991) y por Fa y Morales (1991) acerca de la importancia de la Faja, debido a que en su territorio alberga un alto número de especies de mamíferos de distribución restringida. Es evidente la importancia que la FVTM tiene en la diversidad biológica de México, lo que ha sido corroborado mediante diferentes metodologías, en las que también se ratifica la importancia de conservar áreas dentro de esta provincia.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Juan J. Morrone, Tania Escalante y Luca Ferrari por sus aportaciones al manuscrito, y a Othón Alcántara, César Ríos, Livia León, Raúl Contreras y Alberto González por su apoyo logístico. Los datos de colecta fueron obtenidos de archivos electrónicos proporcionados por Adolfo Navarro (Atlas de aves de México), Livia León, Oscar Flores, Víctor Reynoso, Tania Escalante, José Ramírez-Pulido y Myrna Ambrosio. Este trabajo obtuvo apoyo financiero parcial del proyecto SEMARNAT-CONACYT -2004-C01-311.

#### REFERENCIAS

Alaniz-Álvarez SA, Nieto-Samaniego AF, Ferrari L (1998) Effects of strain rate in the distribution

of monogenetic and polygenetic volcanism in the Transmexican Volcanic Belt. *Geology* 26: 591-594.

Álvarez E, Morrone JJ (2004) Propuesta de áreas para conservación de aves terrestres de México, empleando herramientas panbiogeográficas e índices de complementariedad. *Interciencia* 29: 112-120.

Arita H, Rodríguez P (2001) Ecología geográfica y macroecología. En Llorente-Bousquets J, Morrone JJ (Eds.) *Introducción a la biogeografía en Latinoamérica. Teorías, conceptos, métodos y aplicaciones*. UNAM, México. pp. 63-80.

Benítez H, Arizmendi C, Márquez L (1999) *Base de Datos de las AICAS*. CIPAMEX, CONABIO, FMCN y CCA. México.

Ceballos MD, Navarro D (1991) Diversity and conservation of Mexican mammals. En Mares MA, Schmidly D (Eds.) *Topics in Latin American Mammalian Biology: Ecology, Conservation and Education*. Oklahoma University Press. Norman, OK, EEUU. pp. 166-197.

CIPAMEX-CONABIO (1999) *Áreas de Importancia para la Conservación de Aves*. Escala 1:250000. Consejo Internacional para la Preservación de las Aves-Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. México.

Coldwell R, Coddington J (1994) Estimating terrestrial biodiversity through extrapolation. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*. 345: 110-118.

CONABIO (2000) *Regiones Terrestres Prioritarias*. Escala 1:1000000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.

CONABIO (2003a) *Límite Nacional*. Escala 1:250000. Extraído de Conjunto de Datos Vectoriales y Toponimias de la carta Topográfica. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). CONABIO. México.

CONABIO (2003b) *División Política Estatal*. Escala 1:250000. Extraído de Conjunto de Datos vectoriales y toponimia de la carta topográfica, INEGI 2000, y Marco Geoestadístico Municipal, INEGI 2000. Escala 1:250000. México.

CONANP (2005) *Mapa de las Áreas Naturales Protegidas federales de México*. Escala 1:250000. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. México.

Contreras-Medina R, Eliosa-León H (2001) Una visión panbiogeográfica preliminar de México. En Llorente-Bousquets J, Morrone JJ (Eds.) *Introducción a la biogeografía en Latinoamérica: Teoría, conceptos, métodos y aplicaciones*. UNAM, México. pp. 207-211.

Craw RC, Grehan JR, Heads MJ (1999) *Panbiogeography: Tracking the history of life*. Oxford University Press. Nueva York, EEUU. 229 pp.

Croizat L (1958) *Panbiogeography*. Vols. 1 y 2. Publicado por el autor. Caracas, Venezuela. 1731 pp.

Ego F, Ansen V (2002) Why is Central Trans-Mexican Volcanic Belt (102°-99°W) in transtensive deformation? *Tectonophysics* 359: 189-208.

Escalante T, Rodríguez G, Morrone JJ (2004) The diversification of Nearctic mammals in the Mexican Transition Zone. *Biol. J. Linn. Soc.* 83: 327-339.

Espinoza-Rodríguez JM Ed. (2000) *Regiones terrestres prioritarias de México*. CONABIO. México. 609 pp.

ESRI (1999) *Arc View GIS Ver. 3.2*. Environmental Systems Research Inc., USA.

Fa JE, Morales LM (1991) Mammals and protected areas in the Trans-Mexican Neovolcanic Belt. En Mares MA, Schmidly D (Eds.) *Topics in*

- Latin American Mammalian Biology: Ecology, Conservation and Education*. Oklahoma University Press. Norman, OK, EEUU. pp. 196-227.
- Ferrari L (2000) Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. *Bol. Soc. Geol. Mex.* 53: 84-92.
- García-Marmolejo G (2003) *Áreas prioritarias para la conservación de mamíferos terrestres neotropicales de México con base en métodos biogeográficos*. Tesis. UNAM. México. 111 pp.
- García-Palomo A, Macías JL, Tolson G, Valdez G, Mora JC (2002) Volcanic stratigraphy and geological evolution of the Apan region, east-central sector of the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geofís. Int.* 41: 133-150.
- Gómez-Tuena A, Orozco-Esquivel MT, Ferrari L (2005) Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Bol. Soc. Geol. Mex.* 72: 227-285.
- Grehan JR (1993) Conservation biogeography and the biodiversity crisis: a global problem in space/time. *Biodiv. Lett.* 1: 134-140.
- Grehan JR (2001) Panbiogeografía y la geografía de la vida. En Llorente-Bousquets J, Morrone JJ (Eds.) *Introducción a la biogeografía en Latinoamérica: Teoría, conceptos, métodos y aplicaciones*. UNAM. México. pp. 181-196.
- Humphries CJ, Vane-Wright RI, Williams PH (1991) Biodiversity reserves: Setting new priorities for the conservation of wildlife. *Park* 2: 34-38.
- INEGI (2002) *Localidades de la República Mexicana, 2000*. Obtenido del XII Censo de Población y Vivienda, 2000 del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. CONABIO. México.
- Lugo-Hubp J (1990) El relieve de la República Mexicana. *Rev. Inst. Geol. UNAM* 9: 82-111
- Morrone JJ (2001a) *Sistemática, biogeografía, evolución. Los patrones de la biodiversidad en tiempo-espacio*. UNAM. México. 124 pp.
- Morrone JJ (2001b) *Biogeografía de América Latina y el Caribe*. Sociedad Entomológica Aragonesa N° 3. CYTED-ORCYT.SEA. Zaragoza, España. 148 pp.
- Morrone JJ (2004) Panbiogeografía, componentes bióticos y zonas de transición. *Rev. Bras. Entomol.* 48: 149-162.
- Morrone JJ (2005) Hacia una síntesis biogeográfica de México. *Rev Mex. Biodiv.* 76: 207-252.
- Munguía M (2004) *Representatividad mastofaunística en áreas naturales protegidas y regiones terrestres prioritarias en el Eje Neovolcánico: Un modelo de conservación*. Tesis. UNAM. México. 74 pp.
- Nixon G, Demant A, Armstrong R, Harakal J (1987) K-Ar and geologic data bearing on the age and evolution of the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geofís. Int.* 26: 109-158.
- Ríos NE, Bart HL (2004) *GEOLocate* Ver. 2.03. Tulane University Museum of Natural History. Tulane, LA, EEUU.
- Rojas CA (2004) *Automatización del método de la Panbiogeografía. Identificación de centros de biodiversidad del Parque Nacional Iztacihuatl, Popocatepetl y anexas*. Tesis. UNAM, México. 111 pp.
- Rzedowski J (1978) *La vegetación de México*. Limusa. México. 432 pp.
- Sánchez-Cordero V, Peterson AT, Escalante-Pliego P (2001) El modelado de la distribución de especies y la conservación de la diversidad biológica. En Hernández HM, García AN, Álvarez F, Ulloa M (Comps.) *Enfoques contemporáneos para el estudio de la biodiversidad*. Ediciones Científicas Universitarias. DF. México. pp. 359-380.
- Sánchez-Cordero V, Cirelli M, Murguía M, Sarkar S (2005) Place prioritization for biodiversity representation using species ecological niche modeling. *Biodivers. Inf.* 2: 11-23.
- Sutherland WJ (2000) *The Conservation Handbook: Research, Management and Policy*. Blackwell. Malden, MA, EEUU. 278 pp.
- Szynkaruk E, Garduño VH, Bocco G (2004) Active fault systems and tectono-topographic configuration of the central Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geomorphology* 61: 111-126.
- Trujano M (2004) *Análisis panbiogeográfico de Papilionidae y Pieridae (Lepidoptera: Papilionidae) en México*. Tesis. UNAM. México. 100 pp.
- Vane-Wright R, Humphries C, Williams P (1991) What to protect? Systematics and the agony of choice. *Biol. Conserv.* 55: 235-254.

## TRACE ANALYSIS FOR THE ESTABLISHMENT OF CONSERVATION AREAS IN THE TRANSMEXICAN VOLCANIC BELT

Andrés Torres Miranda and Isolda Luna Vega

### SUMMARY

*The Transmexican Volcanic Belt is recognized as a province based on geologic, tectonic, geomorphologic and biogeographic characteristics. The Belt is a volcanic arch extending from the Pacific coast in Jalisco and Nayarit states to the Atlantic coast in Veracruz. Its formation began in the middle Miocene, with a final episode in the last Pliocene-Quaternary, where most of the volcanic complex was formed. A trace analysis of 136 organisms (birds, mammals, reptiles, ferns and oaks) was undertaken, and 8 generalized traces and 15 nodes were found. Six of them were found in*

*the Cuencas de Toluca-Mexico-Puebla region. Several of the nodes found were reported in previous works, and many of them coincide with priority terrestrial regions and important bird conservation areas. Using complementarity analysis, four conservation priority areas are proposed, following the criteria of conserving the lowest number of areas with a large number of species. These areas are, in order of importance: Valle de México-Sierra de Chichinautzín-Sierra Nevada corridor, Cofre de Perote-Cañón de Río Blanco corridor, Volcán de San Juan node, and Pátzcuaro node.*

## ANÁLISE DE TRAÇOS PARA ESTABELECEER ÁREAS DE CONSERVAÇÃO NA FAIXA VULCÂNICA TRANSMEXICANA

Andrés Torres Miranda e Isolda Luna Vega

### RESUMO

*A Faixa Vulcânica Transmexicana é reconhecida como uma província, baseada em rasgos geológicos, tectônicos, geomorfológicos e biogeográficos. A Faixa é um arco vulcânico que se estende desde as costas do Pacífico nos estados de Jalisco e Nayarit até as costas do Golfo do México em Veracruz. A formação desta província começou no Mioceno médio, com um último episódio no Plioceno Quaternário tardio onde se formaram a maior parte dos complexos vulcânicos atuais. Realizou-se uma análise de traços com 136 organismos (aves, mamíferos, répteis, samambaias e encinos) presentes na Faixa, encontrando-se 8 traços generalizados e 15 nós; 6 destes últimos se encontram na região das Bacias de*

*Toluca-México-Puebla. Vários dos nós encontrados neste trabalho já haviam sido relatados em trabalhos prévios, e muitos deles têm correspondência com Regiões Terrestres Prioritárias e Áreas de Importância para a Conservação das Aves. Mediante uma análise de complementaridade se propõem quatro áreas prioritárias para a conservação de ecossistemas e espécies, seguindo o critério de conservar o menor número de áreas que alberguem o maior número de espécies. Estas áreas são, em ordem de importância: corredor Valle de México-Sierra de Chichinautzín-Sierra Nevada, corredor Cofre de Perote-Cañón de Río Blanco, nó Vulcão de San Juan e nó Pátzcuaro.*