



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

**INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
ÁREA ACADÉMICA DE BIOLOGÍA
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN BIODIVERSIDAD Y CONSERVACIÓN**

**Evaluación del riesgo de extinción de las especies de
Cyatheaceae en dos municipios del estado de Hidalgo, México**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS EN BIODIVERSIDAD Y CONSERVACIÓN
P R E S E N T A:

María Guadalupe Pérez Paredes

DIRECTOR: DR. ARTURO SÁNCHEZ GONZÁLEZ
CO-DIRECTOR: DR. JOSÉ DANIEL TEJERO DÍEZ



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
ÁREA ACADÉMICA DE BIOLOGÍA

MAESTRÍA EN BIODIVERSIDAD Y CONSERVACIÓN

M. EN A. JULIO CESAR LEINES MEDÉCIGO
DIR. ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
P R E S E N T E

Por este conducto le comunico que, después de revisar el trabajo titulado " **EVALUACIÓN DEL RIESGO DE EXTINCIÓN DE LAS ESPECIES DE CYATHEACEAE EN DOS MUNICIPIOS DEL ESTADO DE HIDALGO, MÉXICO**" que presenta la alumna de la Maestría en Biodiversidad y Conservación, **Bíol. María Guadalupe Pérez Paredes**, el Comité Revisor de tesis ha decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación se anotan las firmas de conformidad de los integrantes del Comité Revisor.

PRESIDENTE: M. en C. Manuel González Ledesma

SECRETARIO: Dr. José Daniel Tejero Díez

VOCAL: Dr. Arturo Sánchez González

PRIMER SUPLENTE: Dra. Claudia Teresa Hornung Leoni

Sin otro particular, reitero a Usted la seguridad de mi atenta consideración.

ATENTAMENTE
"AMOR, ORDEN Y PROGRESO"
Mineral de la Reforma, Hgo., a 22 de Abril del 2013.

DR. ORLANDO ÁVILA POZOS
DIRECTOR I.C.B.I.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas las personas e instituciones que de alguna manera contribuyeron a la realización de este trabajo.

Al Centro de Investigaciones Biológicas de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, y en especial al Laboratorio de Sistemática Vegetal, por brindarme la oportunidad y facilidades para mi formación como Maestra en Ciencias.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por haberme otorgado la beca número 254578 para la realización de mis estudios de posgrado.

Al Dr. Arturo Sánchez González por su invaluable paciencia, confianza y dedicación durante el desarrollo de este proyecto y de mi formación académica. Gracias por todos los conocimientos y enseñanzas en el laboratorio y en cada una de las salidas al campo.

A los miembros de mi Comité Revisor, Dr. Daniel Tejero Díez, Dra. Claudia Hornung Leoni y M. en C. Manuel González Ledesma, por sus acertadas observaciones y su compromiso para enriquecer este trabajo.

Al M. en C. Ernesto Chanes Rodríguez Ramírez por su inagotable apoyo en el trabajo de campo y por supuesto por su amistad.

A mis colegas y amigos del laboratorio: Alexis, Yare, Gil, Blanca, Vianey, Erika y Jorge A. González por todos los momentos compartidos.

A mis compañeros del posgrado, Tania, Miguel Ángel, Dante, Carlos, Abraham y Jorge Valencia, por los momentos y experiencias vividos dentro y fuera de las aulas.

Al proyecto "Estructura, diversidad de especies vegetales y distribución actual de los bosques de haya (*Fagus grandifolia* subsp. *mexicana*) en el estado de Hidalgo, México", propuesta 169141, Investigación Científica Básica, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

Al proyecto FOMIX-Hidalgo, "Diversidad Biológica del estado de Hidalgo" 191908 (Tercera etapa).

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mi familia.

A mis padres Isabel y Narciso y a mi hermano Marco, quienes son el mejor ejemplo de perseverancia y trabajo que tengo. Por el apoyo y cariño constantes.

A Memo, por alentarme siempre a alcanzar mis metas. Este trabajo tiene mucho de ti, que me has enseñado el valor de la comprensión, la paciencia y el amor incondicional.

A mis amigos Mayra Lozano, Pablo Esau, Ricardo Luría y Dante Hernández con especial cariño, quienes me han brindado su amistad y apoyo, por la fortuna de conocerlos.

CONTENIDO

	Página
CONTENIDO	iii
Índice de figuras	v
Índice de cuadros	vi
CAPÍTULO I	1
Introducción general	1
Antecedentes	3
Especies presentes en Hidalgo.....	3
<i>Alsophila firma</i> (Baker) D. S. Conant	3
<i>Cyathea fulva</i> (M. Martens & Galeotti) Fée.....	3
Estado de conservación de las especies de Cyatheaceae	3
La Norma Oficial Mexicana: método de evaluación del riesgo de extinción en plantas	4
Objetivos	6
General	6
Particulares	6
Literatura citada	7
CAPÍTULO II	9
Estructura poblacional y características del hábitat de dos especies de Cyatheaceae del estado de Hidalgo	9
Resumen	11
Introducción	12
Material y métodos.....	14
Método.....	15
Resultados	20
Estructura de tamaños de las poblaciones	20
Relación entre la densidad poblacional y las características del hábitat	23
Fenología de los individuos marcados	28
Estructura de edades	29
Discusión.....	31
Estructura poblacional	31
Relación entre densidad de individuos y ambiente	35

	Página
Fenología foliar y edad de los individuos marcados	38
Literatura citada	42
Anexos	48
CAPÍTULO III	49
Distribución actual y potencial de dos especies de Cyatheaceae en el estado de Hidalgo	49
Resumen	50
Introducción	51
Método	53
Datos de distribución actual de las especies	55
Resultados	57
Distribución potencial actual	57
Distribución potencial bajo escenarios de cambio climático	60
Discusión	62
Literatura citada	67
Anexos.....	75
CAPÍTULO IV	76
Discusión general y conclusiones	76
Conclusiones	85
Literatura citada	87
Anexos.....	90

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Área de estudio	14
Figura 2. Tipos de poblaciones de <i>Alsophila firma</i> y de <i>Cyathea fulva</i> con base en la altura de los individuos..	21
Figura 3. Promedio de los parámetros evaluados dentro de las poblaciones de <i>A. firma</i> y <i>C. fulva</i> en dos municipios del estado de Hidalgo.....	22
Figura 4. Árbol de regresión para la densidad poblacional en <i>A. firma</i>	26
Figura 5. Estructura del árbol de regresión para la densidad poblacional en <i>C. fulva</i>	27
Figura 6. Fenología foliar de <i>A. firma</i> y <i>C. fulva</i> evaluada en 20 individuos de cada especie, seleccionados al azar en los municipios de San Bartolo Tutotepec y de Tlanchinol, estado de Hidalgo.	29
Figura 7. Análisis de correlación entre la altura y el número de cicatrices foliares de las dos especies de helechos arborescentes en dos municipios del estado de Hidalgo.	30
Figura 8. Distribución actual (presencia) y potencial de <i>A. firma</i> en el estado de Hidalgo	58
Figura 9. Distribución actual (presencia) y potencial de <i>C. fulva</i> en el estado de Hidalgo	59
Figura 10. Área de traslape de <i>A. firma</i> y <i>C. fulva</i> de acuerdo con su distribución potencial actual en el estado de Hidalgo	60
Figura 11. Distribución potencial de <i>A. firma</i> y <i>C. fulva</i> en el estado de Hidalgo para el año 2050, bajo dos escenarios de cambio climático.....	61

ÍNDICE DE CUADROS

Página

Cuadro 1. Diseño de muestreo para el análisis de la estructura poblacional de dos especies de helechos arborescentes de la familia Cyatheaceae 17

Cuadro 2. Correlación entre la altura y el DAP de los individuos de las poblaciones de *A. firma* y *C. fulva* analizadas..... 23

Cuadro 3. Correlación entre la densidad poblacional y las características del hábitat de las dos especies de helechos arborescentes analizadas..... 25

Cuadro 4. Porcentaje de contribución de las variables seleccionadas y valores de AUC de cada modelo, por especie de Cyatheaceae 57

CAPÍTULO I

Introducción general

Cyatheaceae es la familia mejor conocida de los helechos arborescentes, está constituida por los géneros *Alsophila*, *Cyathea*, *Gymnosphaera*, *Hymenophyllopsis* y *Sphaeropteris*, y comprende más de 600 especies (Smith *et al.*, 2006; 2008).

Los helechos arborescentes de Cyatheaceae (“scaly tree ferns”, llamados así por la presencia de escamas y tricomas en tallos y hojas) presentan tallos tipo estípite, esbeltos (hasta 20 m de altura), no ramificados con hojas coronando el ápice que llegan a medir hasta 5 m de largo. Se distinguen de otras especies de helechos arborescentes principalmente por la posición abaxial de los soros y por la presencia de escamas en la base de los pecíolos (Korall *et al.*, 2006; Mehltreter y García-Franco, 2008).

Pryer *et al.* (2004) sugieren que el origen de este grupo se remonta al Jurásico y que durante el Mesozoico medio se hallaban ampliamente distribuidos en el globo. Sin embargo, debido a los cambios climáticos, muchas de las especies se extinguieron y sólo algunas lograron sobrevivir en zonas montañosas tropicales y subtropicales de manera relictual (Ramírez, 2009).

Actualmente, presentan una distribución principalmente pantropical, aunque se pueden encontrar también en regiones subtropicales, respondiendo a los patrones de distribución de la selva tropical húmeda y el bosque de niebla (Ramírez-Barahona *et al.*, 2011). En México existen 14 especies de helechos arborescentes (Mickel y Smith, 2004) presentes principalmente en el bosque húmedo de montaña (BHM), que tienen una distribución limitada y fragmentaria a lo largo de las principales cadenas montañosas del país. El límite latitudinal de distribución de estas especies es al norte, en los manchones de BHM de Hidalgo, Querétaro y San Luis Potosí, de estos estados, el primero, con una superficie de 21,641 ha de BHM, se ubica como el tercero con mayor superficie de bosque húmedo luego de Oaxaca y Chiapas (Luna-Vega *et al.*, 2000). Hacia el sur su distribución se extiende hasta Centro y Sudamérica (Mehltreter y García-Franco, 2008; Ramírez, 2009).

ANTECEDENTES

Especies presentes en Hidalgo

En el estado de Hidalgo, la familia Cyatheaceae se encuentra representada por dos géneros y tres especies: *Alsophila firma* (Baker) D.S. Conant, *Cyathea fulva* (M. Martens & Galeotti) Fée y *Cyathea bicrenata* Liebm. (Mickel y Smith, 2004; Pérez-Paredes *et al.*, 2012). Se describen las dos primeras que son las que se estudiaron en el presente trabajo, dado que de *C. bicrenata* no se hallaron poblaciones, sólo individuos aislados.

Alsophila firma

Presenta troncos de hasta 10.5 m de alto y 30 cm de diámetro, espigas del estípite alargadas, negras y curvas; escamas peciolares estrechas, café oscuro con largas setas aciculares negras. Las láminas llegan a medir hasta 3 m de largo, y son bipinnadas-pinnatífidas, firmes a subcoriáceas con venas simples. Los soros son mediales y el indusio globoso (Mickel y Smith, 2004).

Cyathea fulva

Presenta troncos de hasta 12 m de alto y 25 cm de diámetro: estípite con espigas robustas y escamas café oscuro sin setas aciculares; lámina bipinnada-pinnatífida hasta de 5 m de largo con venas 1 divididas, rara vez simples; abaxialmente presenta escamas buladas café claro sobre la vena media de los segmentos. Los soros son mediales con indusio globoso, deciduo a la madurez (Mickel y Smith, 2004).

Estado de conservación de las especies de Cyatheaceae

En México, algunas especies de helechos arborescentes de Cyatheaceae son usadas como ornamentales y para la obtención del llamado “maquique”; la estructura fibrosa que se extrae de sus tallos, utilizada para elaborar algunas artesanías e idónea como sustrato para sembrar orquídeas, bromelias, helechos y otras epífitas (Eleutério y Pérez-Salicrup, 2009).

El uso indiscriminado de las poblaciones de helechos arborescentes y el deterioro acelerado de su hábitat, han provocado que varias especies se encuentren actualmente en alguna categoría de riesgo dentro de la norma oficial mexicana (SEMARNAT, 2010).

El género *Cyathea* se incluye dentro del Apéndice II de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres, donde se vela porque el comercio internacional de los especímenes silvestres no constituya una amenaza para su supervivencia (CITES, 2010). En México, las dos especies de Cyatheaceae que se distribuyen en el estado de Hidalgo están catalogadas como sujetas a protección especial (Pr) dentro de la NOM-059-SEMARNAT-2010, por lo que es necesario propiciar su recuperación y conservación (SEMARNAT, 2010). Para ello, se requieren estudios que conlleven no sólo al conocimiento de los factores ambientales que impactan las poblaciones en las localidades donde habitan, sino que también son necesarios estudios sobre ecología poblacional, para entender su comportamiento fenológico y estructura de edades.

Para evaluar el estado de conservación de las especies vegetales, en la propia NOM-059 se han establecido una serie de lineamientos que permiten valorar los parámetros regionales y biológicos para considerar o no a una especie dentro de alguna de las categorías de la norma. Estos lineamientos son considerados, como parte integral del método de trabajo en este estudio.

La Norma Oficial Mexicana: Método de Evaluación del Riesgo de Extinción en Plantas

La NOM-059-ECOL-1994 fue la primera norma oficial creada para identificar a las especies silvestres que se encuentran en riesgo de extinción en México, y se construyó gracias a la consulta con diferentes expertos de los grupos taxonómicos en el país. Sin embargo, las opiniones acerca de los criterios y grados de amenaza para incluir especies en las categorías de riesgo,

variaron entre expertos, esto dio como resultado errores e imprecisiones en la primera lista oficial de las especies (Sánchez *et al.*, 2007).

La posterior modificación y actualización de los instrumentos normativos, dieron como resultado la NOM-059-ECOL-2001 (SEMARNAT, 2002), la cual establece los criterios para incluir, excluir o cambiar la categoría de riesgo, mediante un método de evaluación del riesgo de extinción (MER) que puede ser aplicado a escala nacional, estatal o local, con la finalidad de identificar las especies o poblaciones de flora y fauna silvestres en riesgo en México (Tambutti *et al.*, 2001).

El MER es una herramienta que busca ponderar por medio de una escala numérica jerárquica, los factores que afectan o ponen en riesgo a los taxones. Dicho método utiliza cuatro criterios (A, B, C y D) los cuales son independientes uno del otro y la suma final de éstos, determina la categoría de riesgo dentro de la cual se ubica el taxón en estudio. Tres de los cuatro criterios del método toman en cuenta la biología e historia natural del taxón (la distribución, las características del hábitat y las características biológicas que pueden aumentar su fragilidad ante eventos de disturbio), mientras que el cuarto criterio considera su interacción con el hombre (el impacto de las actividades antropogénicas sobre sus poblaciones).

Debido a las características de las plantas, especialmente en cuanto a la distribución geográfica, especificidad del hábitat y las características demográficas, en la versión más reciente de la NOM-059-SEMARNAT-2010 se presenta el Método de Evaluación del Riesgo de Extinción de Plantas en México “MER-Plantas” (Anexo Normativo II), el cual evalúa el riesgo de extinción de este grupo biológico en particular (SEMARNAT, 2010).

Considerando que no existe ningún estudio encaminado a evaluar el riesgo de extinción de las especies de helechos arborescentes de la familia Cyatheaceae en el bosque húmedo de montaña (BHM) del estado de Hidalgo, los objetivos del presente trabajo fueron:

OBJETIVOS

General

Evaluar el riesgo de extinción de dos especies de helechos arborescentes (Cyatheaceae), en dos municipios con bosque húmedo de montaña del estado de Hidalgo, utilizando como base los criterios del MER-Plantas, propuesto por la SEMARNAT.

Particulares

- Generar información básica sobre la estructura poblacional de dos especies de helechos arborescentes (*Alsophila firma* y *Cyathea fulva*) que se desarrollan en el BHM del estado de Hidalgo, tomando como referencia dos municipios representativos de su área de distribución.
- Caracterizar el hábitat de las dos especies, para definir cuáles son las variables ambientales más estrechamente relacionadas con la densidad y distribución de sus poblaciones.
- Estimar la distribución potencial actual de las dos especies de Cyatheaceae, en el estado de Hidalgo.
- Definir cuáles son las variables ambientales más estrechamente relacionadas con la distribución potencial de las dos especies.
- Realizar predicciones a futuro (hacia el año 2050), sobre el efecto que tendrá el cambio climático en la distribución potencial de las dos especies, considerando dos escenarios hipotéticos de cambio, uno conservador y otro drástico.

LITERATURA CITADA

- CITES. 2010. Apéndices I, II y III. <http://www.cites.org/esp/app/appendices.php>. Consultada: Octubre 2010.
- Eleutério A.A. y Pérez-Salicrup D. 2009. Transplanting tree ferns to promote their conservation in Mexico. *American Fern Journal* **99**: 279-291.
- Korall P., Pryer M.K., Metzgar S.J., Schneider H. y Conant S.D. 2006. Tree ferns: monophyletic groups and their relationships as revealed by four protein-coding plastid loci. *Molecular Phylogenetics and Evolution* **39**: 830-845.
- Luna-Vega I., Alcántara O., Morrone J.J. y Espinosa D. 2000. Track analysis and conservation priorities in the cloud forests of Hidalgo, Mexico. *Diversity and Distributions* **6**: 137-143.
- Mehlreter K. y García Franco J.G. 2008. Leaf phenology and trunk growth of the deciduous tree fern *Alsophila firma* (Baker) D. S. Conant in a lower montane Mexican forest. *American Fern Journal* **98**:1-13.
- Mickel J.T. y Smith A.R. 2004. The Pteridophytes of Mexico. Memoirs of the New York Botanical Garden. 1054 pp.
- Pérez-Paredes M.G., Sánchez-González A. y Tejero-Díez J.D. 2012. Listado de licopodios y helechos del municipio de Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo, México. *Polibotánica* **33**: 57-73.
- Pryer K.M., Schuettpelz E., Wolf P.G., Schneider H., Smith A.R. y Cranfill R. 2004. Phylogeny and evolution of ferns (Monilophytes) with a focus on the early Leptosporangiate divergences. *American Journal of Botany* **91**: 1582-1598.

- Ramírez B.S.A. 2009. Variación genética y filogeografía de helechos arborescentes (Cyatheaceae) del bosque mesófilo de montaña de la Sierra Madre Oriental. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. 111 pp.
- Ramírez-Barahona S.A., Luna-Vega I. y Tejero-Díez D. 2011. Species richness, endemism, and conservation of American tree ferns (Cyatheales). *Biodiversity and Conservation* **20**: 59-72.
- Sánchez O., Medellín R., Aldama A., Goettsch B., Soberón J. y Tambutti M. 2007. Método de evaluación del riesgo de extinción de las especies silvestres en México (MER). INESEMARNAT y CONABIO. 170 pp.
- SEMARNAT. 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-059-ECOL-2001. Diario Oficial de la Federación, México. 153 pp.
- SEMARNAT. 2010. Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. Diario Oficial de la Federación, México. 77 pp.
- Smith A.R., Pryer K.M., Schuettpelz E., Korall P., Schneider H. y Wolf P.G. 2006. A classification for extant ferns. *Taxon* **55**: 705-731.
- Smith A.R., Pryer K.M., Schuettpelz E., Korall P., Schneider H. y Wolf P.G. 2008. Fern classification. In: Ranker T.A. y Haufler C.H. Eds. *Biology and Evolution of Ferns and Lycophytes*. Cambridge University Press. Cambridge. 468 pp.
- Tambutti M., Aldama A., Sánchez O., Medellín R. y Soberón J. 2001. La determinación del riesgo de extinción de especies en México. *Gaceta Ecológica* **61**: 11-21.

CAPÍTULO II

Estructura poblacional y características del hábitat de dos especies de
Cyatheaceae del estado de Hidalgo

Estructura poblacional y características del hábitat de dos especies de Cyatheaceae
del estado de Hidalgo

María Guadalupe Pérez-Paredes¹, Arturo Sánchez-González¹
y José Daniel Tejero-Díez²

¹ Centro de Investigaciones Biológicas, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH), Ciudad Universitaria; Carretera Pachuca-Tulancingo km. 4.5, Mineral de la Reforma, Hidalgo, 42184. Teléfono 01 (771) 71 72 000 (ext. 6655). Correo-electrónico: arturosg@uah.edu.mx

² Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México. Carrera de Biología. Apartado Postal 314. Tlalnepantla, Estado de México. 54090. Correo-electrónico: tejero@servidor.unam.mx

RESUMEN

Los helechos arborescentes (Cyatheaceae) constituyen un componente conspicuo del bosque húmedo de montaña (BHM), también conocido como bosque mesófilo de montaña (cloud forest), en las regiones subtropicales del mundo. En México siguen un patrón de distribución similar, circunscrito casi por completo a la presencia de BHM. La mayoría de las especies de Cyatheaceae están incluidas en alguna categoría de riesgo dentro de la norma oficial mexicana (NOM-059-SEMARNAT-2010) y en las listas rojas internacionales (IUCN, 2008). Sin embargo, la información sobre el estado actual de las poblaciones de la mayoría de las especies de esta familia es escasa o no existe, por lo que no es posible corroborar si su categoría de riesgo dentro de la NOM es la adecuada. Por tal motivo, los objetivos principales del presente estudio fueron: generar información básica sobre la estructura, densidad poblacional y las características del hábitat de *Alsophila firma* y *Cyathea fulva*, dos especies con amplia distribución dentro del BHM de México e incluidas en la categoría de “sujetas protección especial” en la legislación mexicana, para establecer en qué grado, las condiciones actuales de su hábitat, incluido el uso, extracción y comercialización de los individuos, pone en riesgo su supervivencia. Los resultados indican que las poblaciones de ambas especies son normales o dinámicas (con un número elevado de individuos pequeños y de tamaño intermedio), con alto potencial de regeneración y que se desarrollan bajo condiciones micro-ambientales favorables. Todas las poblaciones de *A. firma* y *C. fulva* formaban parte del sub-dosel, en sitios donde la cobertura arbórea fue alta, por lo que son tolerantes a la sombra. La pendiente del terreno y la cobertura del suelo, fueron las variables que mejor explicaron las diferencias en los valores de densidad poblacional en *A. firma*; mientras que en *C. fulva*, fue únicamente la cobertura del dosel. El establecimiento y supervivencia de las poblaciones de ambas especies, depende en gran medida de la conservación de su hábitat (el BHM), debido a que requieren de la existencia de una cobertura arbórea elevada.

INTRODUCCIÓN

Los helechos arborescentes (Cyatheaceae), con su característico tallo y grandes hojas, constituyen un componente conspicuo del bosque húmedo de montaña en las regiones subtropicales alrededor del mundo (Large y Braggins, 2004; Bystriakova *et al.*, 2011).

En la República Mexicana, siguen un patrón de distribución montano, principalmente en la vertiente de sotavento de la Sierra Madre del Sur y Sierra Madre Oriental, y en los extremos oceánicos de la Faja Volcánica Transmexicana. Se encuentran en ambientes de atmósfera saturada de humedad como es el bosque húmedo de montaña (BHM; Cloud forest), donde tienen una distribución más o menos homogénea y llegan a constituirse como parte importante del estrato arbóreo inferior (Ramírez-Barahona *et al.*, 2011).

El BHM en el mundo y en México es un ecosistema con una distribución fragmentaria y limitada a una estrecha faja en la zona montañosa, ocupando preferentemente un intervalo altitudinal que va desde los 1,000 a los 2,500 m (Villaseñor, 2010). Se desarrolla en sitios con características geográficas y ecológicas heterogéneas, con pendientes pronunciadas y en laderas expuestas al viento, en donde es común la alta disponibilidad de agua y humedad atmosférica durante todo el año (Rzedowski, 2006; Villaseñor, 2010). Actualmente se encuentra seriamente amenazado por la actividad antrópica en la explotación forestal y el cambio de uso del suelo, y posee una de las tasas de deforestación más altas entre los bosques templados de México (Villaseñor, 2010; Cruz-Cárdenas *et al.*, 2012; Ponce-Reyes *et al.*, 2012).

La mayoría de las especies de Cyatheaceae se encuentran amenazadas y se incluyen en alguna categoría de riesgo dentro de las listas rojas internacionales (IUCN, 2008) y la norma oficial mexicana (NOM-059-SEMARNAT-2010). En México, *Alsophila firma* y *Cyathea fulva*, son dos especies con amplia distribución dentro del BHM y consideradas en la categoría de “sujetas protección especial” en la legislación mexicana, por lo que es necesario que se generen datos

biológicos a nivel poblacional, para tener la certeza de que el uso, extracción y comercialización de los individuos de las dos especies están adecuadamente fundamentados y que no se ponga en riesgo su supervivencia (Mehltreter y García-Franco, 2008; CITES, 2010).

Al conocer la estructura poblacional (v. gr. la distribución de frecuencias en las distintas categorías demográficas de los individuos y las clases de edad que están mejor representadas) y su fenología (Vandermeer y Goldberg, 2003) se pretende averiguar la dinámica de las poblaciones, aspecto que es útil y necesario, cuando se trata de especies que están incluidas en alguna categoría de riesgo, para establecer estrategias de manejo y conservación a corto, mediano y/o largo plazo (Schmitt y Windisch, 2006; Aguraiuja *et al.*, 2008; Mehltreter, 2010).

En el continente Americano se han realizado un número considerable de estudios en donde se analiza la estructura poblacional y la fenología de varias especies de helechos arborescentes (Sharpe y Mehltreter, 2010). Los resultados de estas investigaciones indican que existe gran variación entre especies y entre hábitats, con respecto a características tales como: producción y germinación de esporas, fenología foliar, tasa de crecimiento, edad de los individuos, preferencias de hábitat, tolerancia al disturbio, entre otras (Bernabe *et al.*, 1999; Arens y Baracaldo, 2000; Schmitt y Windisch, 2006; Mehltreter y García-Franco, 2008; Bystriakova *et al.*, 2011; Schmitt y Windisch, 2012). En el caso de México, se han realizado pocos esfuerzos en el tema y sólo es posible resaltar el estudio de la fenología foliar y el crecimiento de los individuos de una población de *Alsophila firma*, realizado por Mehltreter y García-Franco (2008).

Ante la carencia de información a nivel poblacional de las especies mexicanas de Cyatheaceae y, debido a la necesidad de conocer más sobre varios aspectos fundamentales de la biología de las especies de plantas que se encuentran en alguna categoría de protección, en el presente estudio se plantearon los siguientes objetivos: (1) generar información básica sobre la estructura poblacional de dos especies de helechos arborescentes (*Alsophila firma* y *Cyathea fulva*) que se desarrollan

en el BHM del estado de Hidalgo, tomando como referencia dos municipios representativos de su área de distribución, y (2) caracterizar el hábitat de las dos especies, para definir cuáles son las variables ambientales más estrechamente relacionadas con la densidad y distribución de sus poblaciones.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se localizaron poblaciones de *A. firma* y *C. fulva* en la zona montana del estado de Hidalgo en varias localidades con BHM de los municipios de San Bartolo Tutotepec y Tlanchinol (Figura 1; Anexo 1), en donde previamente, mediante exploración en campo, se habían identificado dichas especies (Álvarez-Zúñiga *et al.*, 2012; Pérez-Paredes *et al.*, 2012).

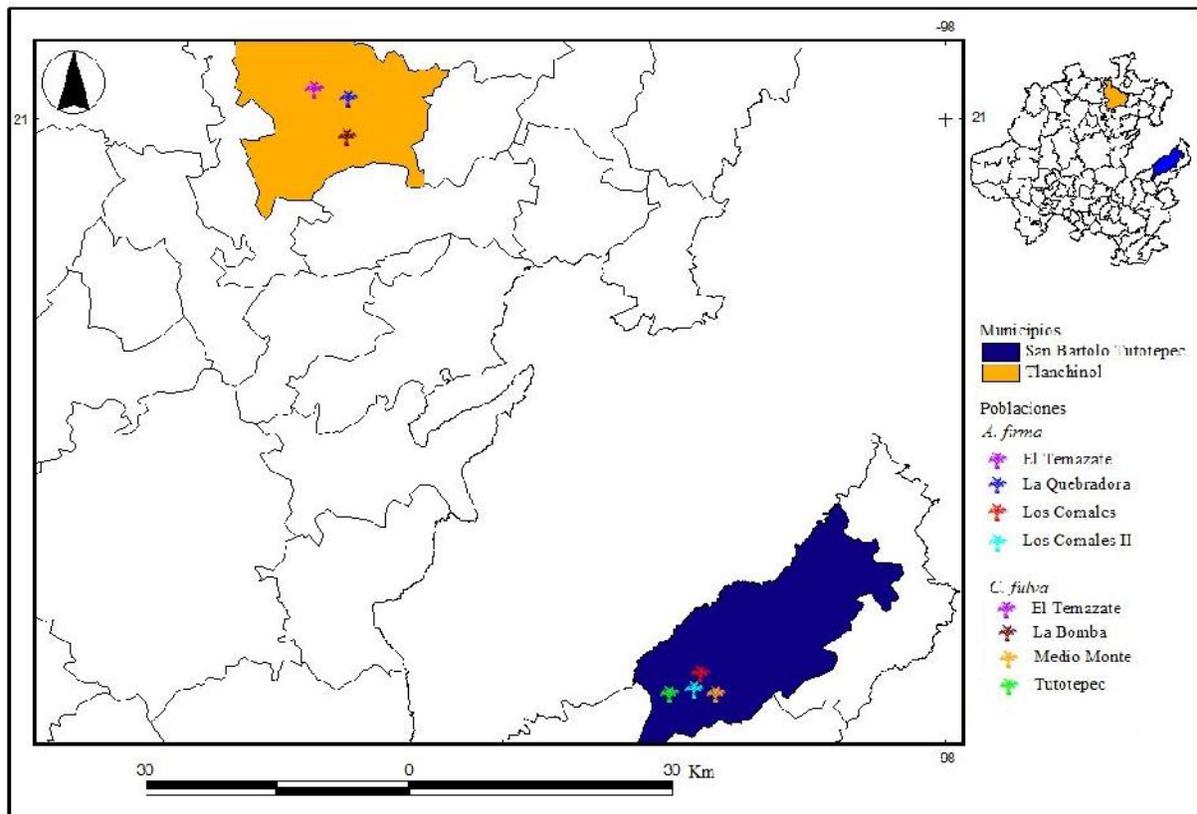


Figura 1. Área de estudio

Tlanchinol. Se ubica al norte del estado de Hidalgo, entre las coordenadas 20°54' y 21°12' de latitud norte y 98°30' y 98°45' de longitud oeste. El intervalo de altitud va de 200 a 1,900 m y ocupa 1.88% de la superficie estatal. Presenta un clima semicálido húmedo con lluvias todo el año y templado húmedo con lluvias todo el año. La mayor parte del municipio está cubierto por BHM (38%) y en menor proporción por bosque tropical (21 %) (INEGI, 2009; Álvarez *et al.*, 2012).

San Bartolo Tutotepec. Se localiza entre las coordenadas 20°19' y 20°37' de latitud norte y 98°02' y 98°21' de longitud oeste; el intervalo altitudinal va de 300 a 2,600 m y ocupa el 1.72% de la superficie del estado. El clima dominante es semicálido húmedo con lluvias todo el año, y en menor proporción templado húmedo con lluvias todo el año, templado húmedo con abundantes lluvias en verano y semifrío húmedo con abundantes lluvias en verano. Los principales tipos de vegetación son BHM (33%), bosque tropical (13%) y pastizal (5 %) (Rzedowski, 2006; INEGI, 2009; Rodríguez-Ramírez *et al.*, 2013).

Método

Estructura poblacional. Para el análisis de la estructura poblacional de *A. firma* y *C. fulva*, se eligieron cuatro poblaciones de cada especie: dos ubicadas en el municipio de San Bartolo Tutotepec y dos en el de Tlanchinol, estado de Hidalgo. Los municipios elegidos representan dos puntos extremos y representativos de la distribución del bosque húmedo de montaña en la entidad.

En el presente estudio se definió a una población local, como un grupo de individuos que viven en el mismo entorno dentro de un hábitat y por consiguiente experimentan condiciones ambientales similares (Hanski y Simberloff, 1997; Agurauja *et al.*, 2008). De acuerdo con esta definición, el criterio de selección de las poblaciones se basó en la presencia de al menos diez

individuos, en sitios en donde el tamaño de fragmento de bosque, permitiera establecer las parcelas de muestreo bajo un dosel continuo, evitando así el efecto de borde. Es importante mencionar que durante los recorridos de campo, no se observaron poblaciones de más de cinco individuos en sitios abiertos (sin cobertura arbórea) o perturbados, únicamente individuos aislados en ambas especies.

El área mínima considerada como representativa para el estudio de las pteridofitas en bosques del neotrópico es de 400 m² (Kluge y Kessler, 2006; Álvarez *et al.*, 2012), lo que coincide con el tamaño de las unidades de muestreo utilizadas para la caracterización poblacional de algunas especies de helechos arborescentes (Schmitt *et al.*, 2009; Alfonso-Moreno *et al.*, 2011); considerando este criterio, en la presente investigación se colocaron tres parcelas de 400 m² cada una, para realizar el muestreo de cada una de las ocho poblaciones de helechos seleccionadas (Cuadro 1), de manera que se establecieron en total 24 parcelas (12 para cada especie).

Dentro de cada parcela de muestreo se contabilizaron las siguientes variables poblacionales: (a) densidad de individuos: cada tallo con una corona de frondas se consideró como un individuo, (b) altura del tallo de cada individuo, (c) diámetro normal del tallo a la altura del pecho (DAP a 130 cm, o en la parte apical del tallo en individuos de menor altura), (d) número de individuos maduros y fértiles y (e) número de hojas (Kingston *et al.*, 2004; Jones *et al.*, 2007). A partir de estas variables se estimó la densidad y la estructura poblacional de cada especie y se definió si éstas eran dinámicas, normales o regresivas, con base en una simplificación del criterio establecido por Aguraiuja *et al.* (2008). En el presente estudio se estableció cualitativamente que, una población dinámica es la que contenía un elevado número de individuos de talla pequeña (de menos de 3 m de altura) y un número menor de individuos de tamaño intermedio (de entre 3 y 7 m de altura) y alto (de más de 7 m); una población normal o estándar se caracterizó por la presencia de individuos de todas las clases de tamaño, pero con predominio de individuos de

altura intermedia; y una población regresiva, por contener un número elevado de individuos altos y un escaso número de individuos de estatura baja e intermedia.

Cuadro 1. Diseño de muestreo para el análisis de la estructura poblacional de dos especies de helechos arborescentes de la familia Cyatheaceae

Parámetros	<i>Alsophila firma</i>	<i>Cyathea fulva</i>
Número de poblaciones	2	2
Número de parcelas por población	3	3
Número de municipios	2	2
Número total de parcelas	12	12

Estudio de la fenología. Con el fin de conocer la periodicidad en la producción y el tiempo de vida de las hojas, se seleccionaron y marcaron al azar 20 individuos de *Cyathea fulva*, en el municipio de San Bartolo Tutotepec y 20 individuos de *Alsophila firma*, en el municipio de Tlanchinol. A cada uno de los individuos marcados se les midieron en cuatro ocasiones entre los años 2011 y 2012, las siguientes características: altura, DAP, número de hojas (nuevas, maduras y senescentes) y número de pecíolos y cicatrices foliares. Debido a que en la mayoría de las especies de *Alsophila* y *Cyathea* que se han estudiado, se ha estimado que la vida media de las hojas es de más de 10 meses (Schmit y Windisch, 2006; Mehlreter y García-Franco, 2008; Sharpe y Mehlreter, 2010; Schmit y Windisch, 2012), en el presente estudio se consideró adecuado un intervalo de tiempo entre mediciones de entre cinco y seis meses.

Un análisis de correlación lineal simple permitió estimar el grado de relación entre las variables: altura, DAP y número de cicatrices foliares, utilizando el programa de cálculo

Statistica versión 9 (StatSoft Inc., 2010). Adicionalmente, se utilizaron dos procedimientos convencionales para estimar la edad aproximada de los individuos: en el primero se dividió la altura total de las plantas entre el crecimiento promedio anual del tronco y en el segundo, se dividió el número total de cicatrices foliares entre el número de hojas producidas anualmente (Sharpe y Mehltreter, 2010).

Caracterización del hábitat. El hábitat de los helechos se caracterizó en cada parcela, con base en las siguientes variables ambientales: altitud, cobertura del dosel, orientación, pendiente y, mediante la descripción de la estructura de la vegetación, considerando las especies dominantes (*sensu* Rzedowski, 2006). Adicionalmente, con la finalidad de establecer si existe relación entre la densidad poblacional y las condiciones del hábitat, en cada parcela se estimó el grado de perturbación a través de las variables: número de brechas y/o caminos, distancia a sitios de actividad humana (poblados) y vías de comunicación (carreteras, caminos de terracería); cobertura de rocas, hierbas y arbustos recurrentes; indicios de incendios, extracción de plantas, tala de árboles y deslaves evidentes.

La relación entre la densidad de las poblaciones de cada especie y los factores ambientales antes mencionados, se analizó mediante técnicas de análisis lineal (correlación bivariada) y no lineal (árboles de regresión), con el programa de cálculo Statistica versión 9 (StatSoft Inc., 2010).

Los árboles de regresión no hacen suposiciones *a priori* sobre algún tipo de comportamiento entre las variables estudiadas, por lo que son útiles para exponer relaciones no lineales, facilitando así la interpretación de los datos (Sánchez-González y López-Mata, 2005; Kallimanis *et al.*, 2007). El algoritmo de los árboles de regresión fue diseñado para realizar particiones recursivas de los datos, generando subgrupos cada vez más homogéneos; en cada división se elige de entre las variables independientes (categóricas y/o continuas), a la que produce como

valor umbral la mayor reducción en la suma de cuadrados del error para la variable dependiente. El modelo resultante está estructurado desde un nodo inicial (raíz), que se continua a través de una serie de divisiones binarias de las variables independientes o explicativas (tallos), hasta los nodos terminales (hojas). La estimación para todas las observaciones que siguen la misma vía desde la raíz hasta una determinada hoja es el valor promedio de la variable dependiente para ese subconjunto de observaciones (Moody y Meentemeyer, 2001; Sánchez González y López-Mata, 2005).

RESULTADOS

Estructura de tamaños de las poblaciones

La mayoría de los individuos de *A. firma* en la localidad de El Temazate (n= 138) pertenecen a clases de tamaño pequeñas (plantas jóvenes de menos de 3 m de alto= población dinámica), pocos son de tamaño intermedio (miden entre 3 y 7 m de altura) y no se encontraron individuos altos (de más de 7 m; Figura 2a), por la que la población puede considerarse como dinámica; en La Quebradora (n= 203), la distribución de tamaños es similar, excepto por la presencia de dos individuos de más de 7.5 m de altura (Figura 2b). En la población de Los Comales (n= 36), la distribución de tamaños es más homogénea (población normal), la mayoría de los individuos son de estatura baja e intermedia y sólo tres miden 8 m o más (Figura 2c); en Los Comales II (n= 10) nueve de los individuos fueron pequeños (población dinámica), uno fue de tamaño intermedio y no se observaron individuos altos (Figura 2d).

En el caso de *C. fulva*, la mayoría de los individuos de la población de El Temazate (n= 68) son de tamaño intermedio (población normal) y el número disminuye en ambos extremos de la distribución (Figura 2e): pocos individuos son de tamaño pequeño y sólo dos presentan alturas de 8 m o más (plantas maduras). En la población de La Bomba (n= 34) la distribución de tamaños es un poco más homogénea (población normal); aunque la mayoría es de talla intermedia, también están representados individuos de estaturas bajas y altas (Figura 2f). En la población de Medio Monte (n= 67), la distribución de tamaños es sesgada: la mayoría de los individuos son de tamaño pequeño (población dinámica), pocos son de estatura intermedia y no se encontraron individuos altos, de más de 7 m (Figura 2g); el mismo patrón de distribución se detectó en la población de Tutotepec (n= 43) (Figura 2h).

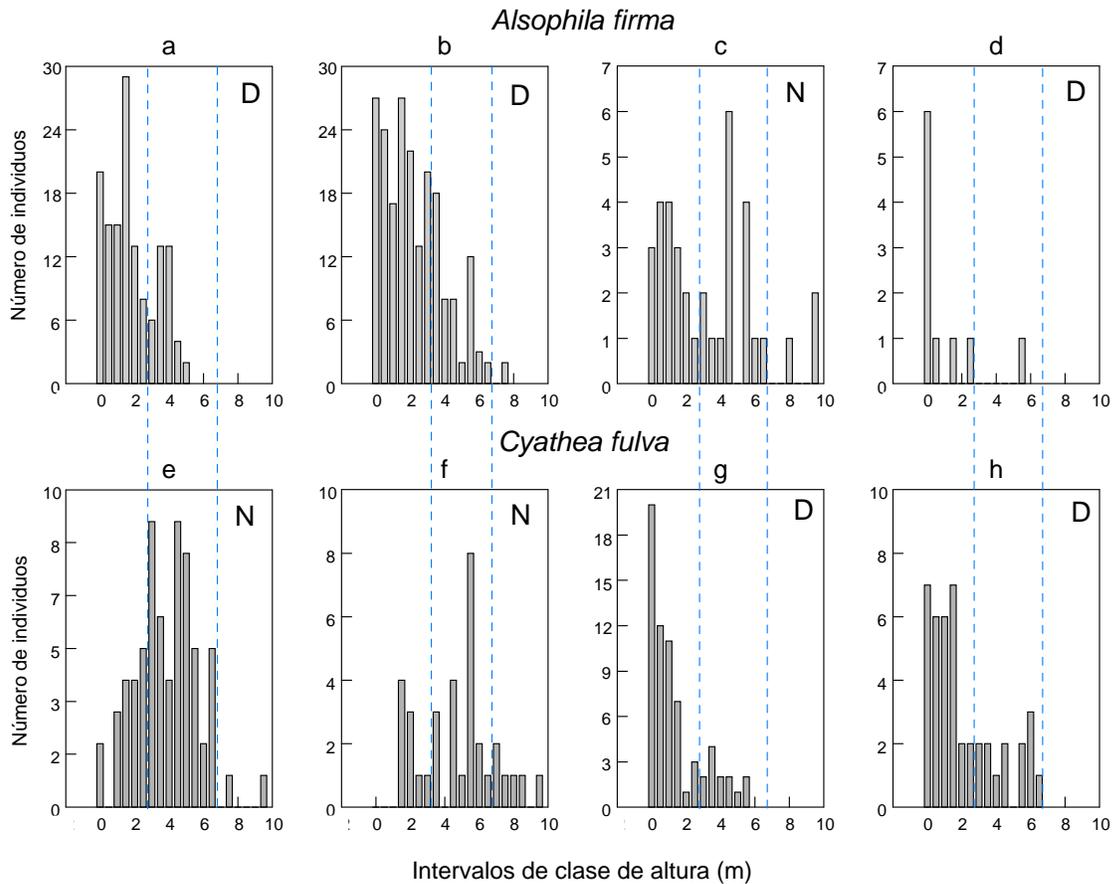


Figura 2. Tipos de poblaciones de *Alsophila firma* y de *Cyathea fulva* con base en la altura de los individuos. El Temazate (a) y La Quebradora (b), en Tlanchinol; Los Comales (c) y Los Comales II (d), en San Bartolo Tutotepec; El Temazate (e) y La Bomba (f), en Tlanchinol; Medio Monte (g) y Tutotepec (h), en San Bartolo Tutotepec. D= dinámica, N=normal.

De acuerdo con las variables evaluadas, la población de *A. firma* de Los Comales, presentó individuos con mayor altura (368 ± 45 cm) y con mayor DAP promedio (14.5 ± 0.65); el mayor número promedio de hojas o frondas se encontró en las poblaciones ubicadas en Los Comales y Los Comales II. El número de individuos fue considerablemente mayor en las dos poblaciones ubicadas en el municipio de Tlanchinol (Figura 3a-3d).

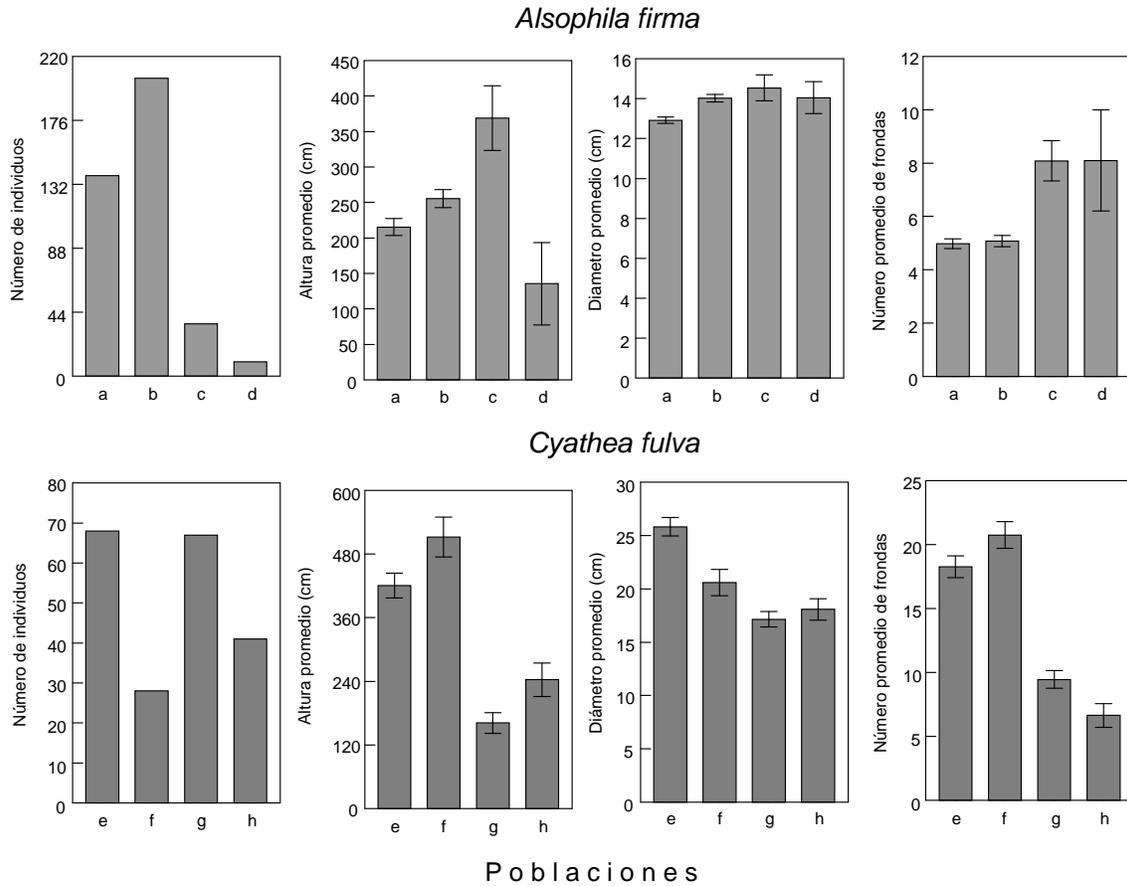


Figura 3. Promedio de los parámetros evaluados dentro de las poblaciones de *A. firma* y *C. fulva* en dos municipios del estado de Hidalgo. El Temazate (a) y La Quebradora (b), en Tlanchinol; Los Comales (c) y Los Comales II (d), en San Bartolo Tutotepec; El Temazate (e) y La Bomba (f), en Tlanchinol; Medio Monte (g) y Tutotepec (h), en San Bartolo Tutotepec.

En el caso de las poblaciones de *Cyathea fulva*, en la localidad de La Bomba se encontraron los individuos más altos (517 ± 40 cm) y con mayor número de hojas (20.76 ± 1.03); y en El Temazate los de mayor Dap (20.76 ± 0.86 cm). Con respecto a la densidad, las localidades con mayor número de individuos fueron El Temazate y Medio Monte; la proporción de individuos estériles y fértiles fue diferente en cada población y en la localidad de Tutotepec no se detectaron individuos con frondas fértiles (Figura 3 e-h).

La correlación entre la altura y el diámetro normal (Dap a 130 cm) de los individuos fue positiva y estadísticamente significativa ($p < 0.01$), en todas las poblaciones de *C. fulva* y en tres de las cuatro poblaciones de *A. firma* (Cuadro 2). La excepción fue la población de Los Comales II, lo cual puede deberse a un sesgo provocado por el escaso número de individuos de *A. firma* ($n=10$) que se desarrollan en este sitio (Figura 4).

Cuadro 2. Correlación entre la altura y el DAP de los individuos de las poblaciones de *A. firma* y *C. fulva* analizadas

Localidad	<i>A. firma</i>	Localidad	<i>C. fulva</i>
El Temazate	$r=0.43$	El Temazate	$r= 0.68$
La Quebradora	$r=0.45$	La Bomba	$r=0.57$
Los Comales	$r=0.47$	Medio Monte	$r=0.73$
Los Comales II	$r=0.60$	Tutotepec	$r=0.85$

En todos los casos $p < 0.01$, excepto en Los Comales II ($p=0.06$)

Relación entre la densidad poblacional y las características del hábitat

Se encontró que las condiciones ambientales en donde se desarrollan las dos especies estudiadas son semejantes: las poblaciones crecen sólo en sitios donde la cobertura del dosel es superior a 90% y la pendiente del terreno es elevada (entre 30 y 60°).

El dosel del bosque en donde habitan las poblaciones de *A. firma* está dominado por *Quercus* spp. y el sub-dosel por helechos arborescentes; el sotobosque es pobre en especies de arbustos y herbáceas; y la pendiente del terreno es mayor de 50°, excepto en Los Comales II. En las localidades El Temazate y Los Comales se presentan pequeños arroyos a lo largo de los cuales se incrementa la densidad de individuos de *A. firma*. En el cerro La Quebradora los derrumbes

ocurridos durante la época de lluvias provocaron la caída de árboles y la formación de claros; y en Los Comales II, la población está expuesta a la perturbación, pues se desarrolla cerca de una vereda muy transitada, utilizada para la extracción de madera, por lo que es frecuente la presencia de personas con animales de carga.

Con respecto a *C. fulva*, en la localidad La Bomba el dosel del bosque es dominado por *Liquidambar macrophylla* y *Quercus* spp.; el subdosel ocupado por los helechos arborescentes es más denso a lo largo de un pequeño riachuelo paralelo al camino principal; en este sitio hay veredas dentro del bosque y es común la extracción de madera. La otra población de *C. fulva* de El Temazate coexiste con la de *A. firma*.

Una de las poblaciones de *C. fulva* del municipio de San Bartolo Tutotepec, forma parte de un bosque con un estrato arbóreo dominado por *Quercus* spp., codominado por *Magnolia schiedeana* y *Persea americana* y en el estrato arbustivo sobresale *Lophosoria quadripinnata*. Esta población crece cerca de un arroyo y de un potrero, a pocos metros de un camino principal de terracería. La otra población de *C. fulva* se desarrolla en la localidad de Tutotepec, en un bosque dominado por *Fagus grandifolia* subsp. *mexicana* (haya) y co-dominado por encinos (*Quercus* spp.); el subdosel se compone de los helechos arborescentes *C. fulva* y *Dicksonia sellowiana*, que se presentan con mayor densidad a lo largo de un pequeño riachuelo.

Con respecto a la distancia a vías de comunicación, algunas de las poblaciones de helechos estudiadas se ubican en zonas cercanas a carreteras pavimentadas o caminos de terracería, que se han construido o ampliado recientemente, lo que las vuelve más vulnerables o susceptibles a los cambios provocados por las actividades humanas (Cuadro 3).

Cuadro 3. Correlación entre la densidad poblacional y las características del hábitat de las dos especies de helechos arborescentes analizadas

VARIABLES	<i>A. firma</i>	<i>C. fulva</i>
Cobertura de hierbas y arbustos	-0.04	-0.21
Porcentaje de rocas en el suelo	0.60*	-0.21
Presencia de caminos y/o brechas	0.38	0.01
Distancia a sitios de actividad humana	0.75*	0.21
Evidencia de deslaves	0.80*	0
Cobertura de dosel	0.65*	-0.15
Altitud	-0.84*	0.08
Pendiente	0.21	0.12
Orientación	-0.74*	0.20

En *A. firma* el análisis de correlación lineal bivariada advierte que la densidad poblacional se correlaciona de manera positiva y estadísticamente significativa con variables indicadoras de disturbio (distancia a sitios de actividad humana, evidencia de deslaves) y ambientales (porcentaje de rocas en el suelo y cobertura del dosel). La altitud y la orientación se correlacionaron de forma negativa y estadísticamente significativa con la densidad poblacional.

El árbol de regresión permitió describir la densidad poblacional en ambas especies de helechos a partir de unas cuantas variables indicadoras. Los resultados derivados del árbol de regresión en *A. firma*, fueron en general consistentes con los obtenidos con la regresión lineal bivariada, pues indican que la altitud es el factor ambiental más importante en la explicación de los valores observados. La estructura del árbol de regresión señaló dos opciones correlacionadas con una mayor o menor densidad de individuos (Figura 4). La primera opción sugiere que la mayor densidad poblacional se presentó en altitudes menores de 1,668 m, en sitios donde la pendiente es menor de 52.5% y el porcentaje de rocas en el suelo mayor de 67.5% (Figura 4, flecha con líneas

continuas). En los sitios donde la pendiente del terreno fue mayor de 52.5% la densidad poblacional se redujo drásticamente, pero en los sitios donde el porcentaje de rocas en el suelo fue menor de 67.5% la densidad disminuyó, aunque siguió siendo elevada. La segunda opción muestra que en los sitios ubicados a más de 1,668 m de altitud y con presencia de caminos o veredas, la densidad poblacional fue baja (Figura 4, flecha con líneas discontinuas).

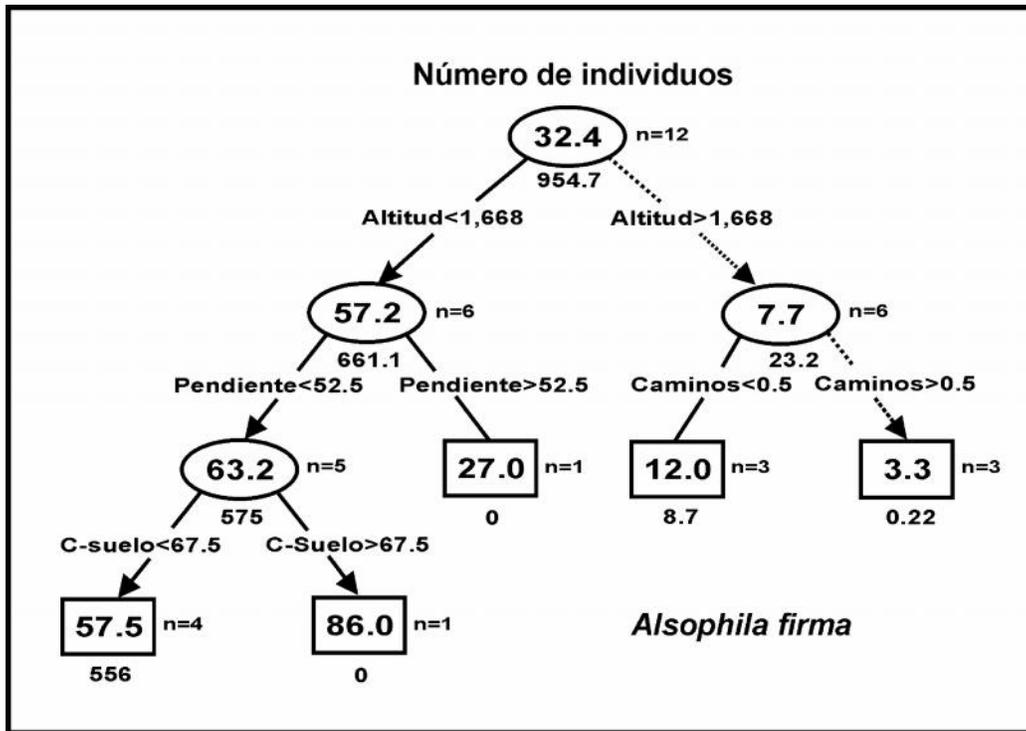


Figura 4. Árbol de regresión para la densidad poblacional en *A. firma*. Las elipses y los rectángulos representan los nodos no terminales y terminales, respectivamente. Los números dentro de cada elipse o rectángulo indican el promedio del número de individuos de las poblaciones, que fluyen por las ramas del árbol hacia un nodo terminal particular. Los números bajo cada elipse o rectángulo indican la suma de cuadrados asociados con el promedio aritmético de todas las muestras que permanecen a través de los nodos. Los valores en las conexiones entre nodos representan los criterios de decisión por medio de los cuales una determinada variable del medio provee las bases para la división. Los vectores con líneas continuas representan la vía que determina la densidad poblacional más alta en el árbol de regresión y los vectores con líneas discontinuas indican la vía que determina la densidad poblacional más baja. C-suelo= porcentaje de rocas en el suelo; Caminos= presencia de caminos o veredas dentro del bosque.

En *C. fulva* los resultados fueron diferentes, pues la densidad poblacional no se correlaciona linealmente, de manera significativa con ninguna de las variables ambientales consideradas en el presente estudio. Sin embargo, el árbol de regresión permitió identificar a la cobertura del dosel como la variable más estrechamente relacionada con la densidad poblacional. Es decir, en los sitios donde la cobertura del dosel fue menor de 99.1%, se presentó un número promedio alto de individuos (20.2), pero cuando la cobertura del dosel fue mayor de 99.2% el número promedio de individuos por sitio resulto bajo: igual o menor de diez. En siete de los 12 sitios analizados, una cobertura del dosel mayor de 90.6% pero menor de 98.8%, dio como resultado la presencia de 16.1 individuos, en promedio.

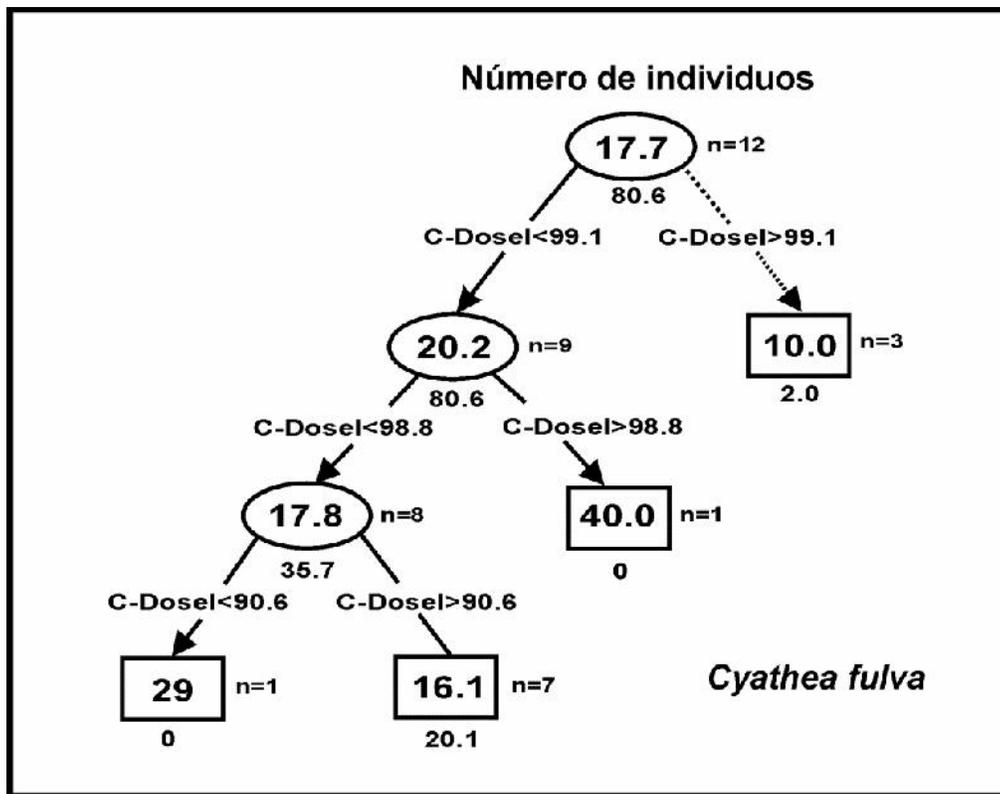


Figura 5. Estructura del árbol de regresión para la densidad poblacional en *C. fulva*. La interpretación con respecto a las elipses, flechas y rectángulos es semejante a la de la Figura 4. C-Dosel= cobertura del dosel.

Fenología de los individuos marcados

Producción de hojas: en los individuos de ambas especies es asincrónica, es decir, se pueden observar hojas nuevas (circinios), hojas maduras (vegetativas y fértiles) y hojas senescentes tanto en la época de lluvias (Junio-Octubre), como en la época de secas (Noviembre-Mayo). Sin embargo, en *A. firma*, la producción promedio de hojas jóvenes (circinios) fue más elevada en los meses incluidos en la época de secas (Marzo y Enero), la de las hojas maduras en los meses incluidos en la época de lluvias (Octubre y Agosto); y la producción de hojas senescentes fue independiente de la época del año (Figura 6).

La fenología foliar fue diferente en *C. fulva*, dado que el mayor número promedio de hojas nuevas y senescentes ocurrió durante la época de lluvias (Junio) y la de hojas maduras en diciembre, mes considerado dentro de la época de secas (Figura 6). De acuerdo con los datos de la estación meteorológica de San Bartolo Tutotepec, los valores de temperatura promedio y precipitación pluvial total mensual difirieron marcadamente entre épocas del año (secas y lluvias), durante el periodo que comprendió el estudio.

El tiempo promedio de vida de las hojas, difirió entre individuos y entre especies; fue de aproximadamente 10 meses en *A. firma* y de cerca de 18 meses en algunas de las hojas de los individuos de *C. fulva*, que fue el periodo de tiempo que abarcó el presente estudio.

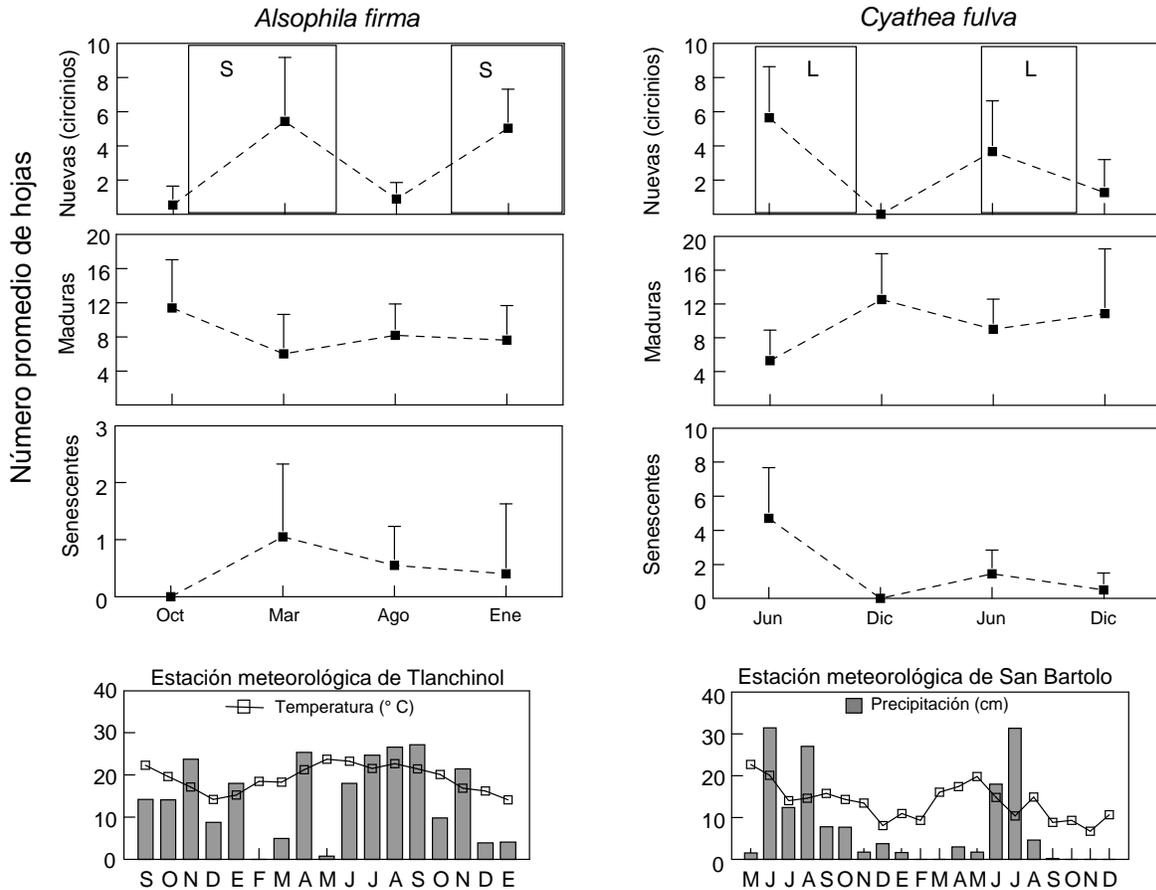


Figura 6. Fenología foliar de *A. firma* y *C. fulva* evaluada en 20 individuos de cada especie, seleccionados al azar en los municipios de San Bartolo Tutotepec y de Tlanchinol, estado de Hidalgo.

Estructura de edades

En los individuos marcados de ambas especies, se estimó que existe una correlación positiva altamente significativa ($p < 0.01$) entre la altura y el número de cicatrices foliares: en *A. firma*, $r = 0.84$, y en *C. fulva*, $r = 0.83$. Una ecuación lineal simple representó adecuadamente esta relación en ambas especies (Figura 7). Por otra parte, con los datos de altura inicial y final de los

individuos se estimó que el crecimiento promedio anual del tallo en *A. firma* fue de 7.2 cm y en *C. fulva* de 10.2 cm.

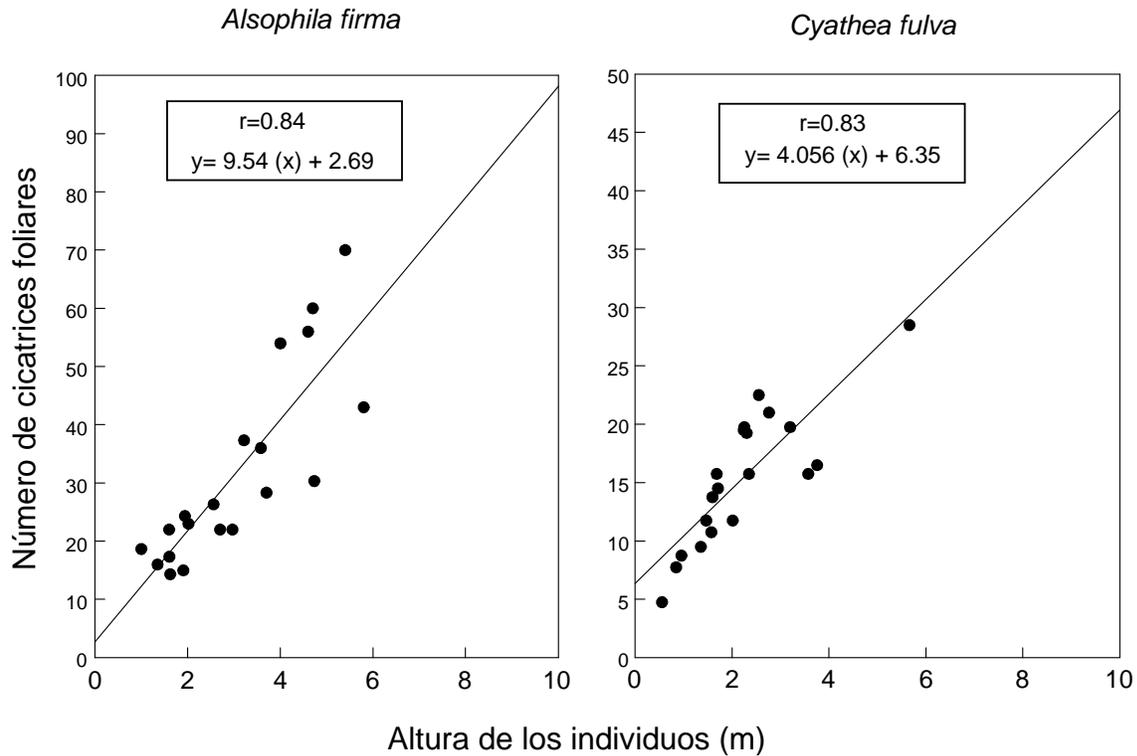


Figura 7. Análisis de correlación entre la altura y el número de cicatrices foliares de las dos especies de helechos arborescentes en dos municipios del estado de Hidalgo. En *A. firma* $r=0.84$; y en *C. fulva* $r=0.83$, en ambos casos $p<0.01$. Se incluye la ecuación de regresión lineal.

Considerando el valor de la tasa de crecimiento promedio por planta en *A. firma*, un individuo de 4 m de altura puede tener una edad de cerca de 46 años, pero con base en el número de cicatrices foliares su edad sería de alrededor de 31 años. En el caso de *C. fulva*, un individuo de la misma altura (4 m) tendría, con base en la tasa de crecimiento promedio, 39 años y por el número de cicatrices foliares, 34 años.

DISCUSIÓN

Estructura poblacional

En las dos especies de helechos arborescentes analizadas se encontraron poblaciones normales y dinámicas (tres dinámicas y una normal en *A. firma*; dos dinámicas y dos normales en *C. fulva*).

De acuerdo con varios autores, la ocurrencia de poblaciones dinámicas (con predominio de individuos jóvenes o de tamaño pequeño) en varias especies de helechos arborescentes: por ejemplo en *Alsophila auneae* (Tanner, 1983), *Cyathea spinulosa* (Nagano y Suzuki, 2007) y *Dicksonia sellowiana* (Schmitt y Windisch, 2005), es un indicador de que tienen un alto potencial de regeneración y expansión (Schmitt y Windisch, 2005; Schmitt y Windisch, 2007) y de que se desarrollan bajo condiciones micro-ambientales favorables para el establecimiento tanto de los gametofitos como de los esporofitos (Bernabe *et al.*, 1999; Mehltreter y García-Franco, 2008).

Sin embargo, este tipo de poblaciones con predominio de individuos jóvenes, también puede ser producto de la acción de otros factores externos (v. gr. extracción ilegal de individuos adultos para comercializarlos o para obtener el “maquique”), lo que redundaría en la modificación de la estructura de edades de la población, por la disminución del número de individuos maduros y viejos (Eleutério y Pérez-Salicrup, 2009).

De acuerdo con Mehltreter y García-Franco (2008), la baja frecuencia de individuos en una clase de tamaño determinada, en una población de *A. firma* de Huatusco, Veracruz, puede estar relacionada con eventos o disturbios que ocurrieron en el pasado. La edad de los individuos, estimada a través del crecimiento promedio anual del tronco, permitió a los autores referidos calcular el tiempo aproximado en el que ocurrió el disturbio. Con base en esta interpretación, una probable explicación de la ausencia de individuos en al menos una clase de tamaño en la mayoría de las poblaciones de *A. firma* y *C. fulva*, puede estar relacionado con la ocurrencia de disturbios aislados o eventos estocásticos en diferentes tiempos en cada una de las localidades estudiadas.

En la población de *A. firma* de la localidad “Los Comales II” en particular, es evidente que las actividades humanas de las últimas décadas (conversión del bosque en potrero) han modificado de manera intermitente las condiciones del bosque, afectando a su vez la estructura poblacional, que carece de individuos en varias de las clases de tamaño consideradas.

En el mismo sentido, la ausencia de individuos de menos de 1.5 m de altura en una de las poblaciones de *C. fulva* (localidad La Bomba), sugiere que cambios recientes en las condiciones ambientales (tal vez en la última década), han sido desfavorables para el establecimiento de las esporas y/o el desarrollo de las plántulas, dando como resultado una tasa de mortalidad de 100%. Acorde con lo anterior, Mehlreter y García-Franco (2008) proponen que el escaso número de individuos en las primeras clases de edad en una población de *A. firma* en Huatusco, Veracruz, puede estar relacionado con la disminución en la cantidad de microambientes disponibles para la reproducción exitosa de los individuos. Los datos y observaciones en campo apoyan esta hipótesis con respecto a la localidad de La Bomba: la tala ilegal de árboles, la extracción de leña y la apertura de caminos, están provocando cambios considerables en la estructura y composición del bosque donde se desarrolla la población de *C. fulva*, que probablemente estén afectando negativamente la germinación y desarrollo de las plántulas, tal como ha ocurrido con poblaciones de *Cyathea australis* y *Dicksonia antarctica* como resultado de la tala controlada de los bosques húmedos del sureste de Australia (Ough y Murphy, 2004).

Con respecto a la existencia de poblaciones normales o estables de helechos arborescentes, caracterizadas por la presencia de individuos en todas las clases de tamaño y con mayor frecuencia en las clases intermedias, puede interpretarse como un indicador de que las condiciones ambientales locales han permanecido sin cambios apreciables durante varias décadas (considerando el lapso de vida de las especies de helechos arborescentes), lo que da como

resultado una tasa constante de reclutamiento de individuos (Large y Braggins, 2004; Schmitt y Windisch, 2005; Sharpe y Mehltreter, 2010).

Como era de esperarse, todas las poblaciones consideradas como dinámicas de *A. firma* y *C. fulva* presentaron valores promedio de altura de los individuos, diámetro del tallo y número de frondas, inferiores que las poblaciones normales, por contener un mayor número de individuos jóvenes. Como la producción de hojas nuevas en los helechos arborescentes va acompañada de la elongación del tallo, las plantas de mayor edad son más altas y presentan un mayor número de hojas que las juveniles (Nagano y Susuki, 2007; Mehltreter y García-Franco, 2008).

Se ha documentado que las especies de helechos arborescentes difieren en su tolerancia a diferentes condiciones de luz (Bernabe *et al.*, 1999; Eleutério y Pérez-Salicrup, 2009), se les puede encontrar en los claros del bosque o persistiendo en etapas tardías de la sucesión (Bystriakova *et al.*, 2011). En el presente estudio, todas las poblaciones de ambas especies formaban parte del sub-dosel, en sitios donde la cobertura arbórea fue mayor de 89%, por lo que pueden considerarse como tolerantes a la sombra (esciófilos). Las observaciones en campo y los experimentos de trasplante realizados por Eleutério y Pérez-Salicrup (2009), apoyan la idea de que *A. firma* y *C. fulva* se desarrollan mejor en condiciones de sombra que en sitios abiertos.

De acuerdo con Arens (2001) y Bystriakova *et al.* (2011), las especies de helechos tolerantes a la sombra tienen tasas de crecimiento lentas, porque ajustan su metabolismo a las restricciones en la cantidad de luz que reciben desde que germinan y se establecen. Como resultado de ello, sus poblaciones tienden a tener una estructura de tamaños y edades sesgada, con muchos individuos pequeños y pocos altos. La información anterior, concuerda con los resultados obtenidos en el presente estudio, pues la mayoría de las poblaciones en ambas especies de helechos fueron clasificadas como dinámicas.

El crecimiento del tallo en helechos arborescentes varía ampliamente entre especies y entre hábitats (Schmitt y Windisch, 2012); la relación entre tamaño del tallo y edad es controversial y cuando existe no es necesariamente lineal, debido principalmente a que la tasa de crecimiento no es constante en todas las etapas del ciclo de vida de los individuos (Schmitt y Windisch, 2006) y a que las condiciones ambientales cambian a través del tiempo (Arens, 2001). Sin embargo, en el presente estudio los individuos mostraron una distribución agrupada en cada población, por lo que es probable que a lo largo de su desarrollo experimentaran condiciones ambientales relativamente similares (v. gr. en la cantidad de luz recibida).

El patrón de distribución gregaria en los helechos arborescentes, más evidente a lo largo de arroyos o de sitios con pendientes muy pronunciadas, es común en varios grupos de plantas en los bosques húmedos (Condit *et al.*, 2000; Plotkin *et al.*, 2000; Mehltreter y García-Franco, 2008) y puede atribuirse a la existencia de micro-ambientes idóneos para las plantas, a la reproducción vegetativa y a la tendencia de la mayoría de las esporas o semillas a establecerse cerca de la planta madre, entre otras causas (Jones *et al.*, 2007).

Bystriakova *et al.* (2011), mencionan que el diámetro del tallo en los helechos arborescentes no aporta una información fidedigna sobre el tamaño de los individuos, debido a que cambia poco y se mantiene casi constante conforme crecen las plantas. Sin embargo, en el presente estudio se estimó que existe una correlación estadísticamente significativa entre la altura y el DAP de los individuos en todas las poblaciones de ambas especies, con excepción de la población de Los Comales II, lo que puede atribuirse a varias causas: (1) existe una correlación entre ambos parámetros en las especies analizadas (Arens y Baracaldo, 2000; Price y Weitz, 2012), (2) la correlación lineal entre altura-diámetro es significativa sólo cuando se consideran las primeras etapas de desarrollo (sólo en individuos de tallas pequeñas y medianas), pero podría cambiar si se integran datos de individuos de mayor altura, porque en las poblaciones analizadas había muy

pocos organismos de más de 6 m de alto, en los que el DAP varía muy poco, y (3) por su hábito de crecimiento agrupado, es probable que la mayoría de los individuos analizados, presentaran una tasa de crecimiento constante en diámetro y altura durante su desarrollo, debido a que experimentaron la misma variación en las condiciones ambientales, principalmente con respecto a la cantidad de luz (Arens, 2001).

La cobertura del dosel en todas las localidades analizadas fue mayor de 89%, por lo que es posible suponer que las condiciones ambientales (v. gr. radiación solar, temperatura del suelo), han permanecido relativamente homogéneas para la mayoría de las poblaciones de las dos especies de helechos arborescentes estudiadas, al menos durante las últimas décadas.

Relación entre densidad de individuos y ambiente

Uno de los supuestos básicos en ecología evolutiva es que las especies estrechamente emparentadas tienden a ser más similares entre sí, que con respecto a otras más distantemente relacionadas. Por lo tanto, los parientes cercanos comparten semejanzas en su morfología, anatomía, fisiología, historia de vida, así como en su nicho ecológico (Cooper *et al.*, 2010). Acorde con esta información, las condiciones climáticas en donde se desarrollan las poblaciones de *A. firma* y *C. fulva* analizadas en el presente estudio, se pueden incluir dentro del intervalo general de variación descrito por Bystriakova *et al.* (2011): la mayoría de las especies de Cyatheaceae, tienen un elevado conservadurismo filogenético del nicho, con respecto a las condiciones climáticas donde se desarrollan, ya que están restringidas a regiones en donde las temperaturas mínimas, raramente están por debajo del punto de congelación y la cantidad de lluvia es alta y esta equitativamente distribuida a lo largo del año.

Sin embargo, a una escala local, otros factores ambientales además de los climáticos, como por ejemplo edáficos y topográficos, también pueden influir en la distribución y abundancia de las

poblaciones de helechos (Landi y Angiolini, 2008). Tanto la técnica de correlación lineal como la de árboles de regresión, permitieron identificar a las variables ambientales más relacionadas con la densidad poblacional; sin embargo, los resultados obtenidos con los árboles de regresión fueron más útiles, detallados y fáciles de interpretar, tal como se ha señalado en otras investigaciones (Moody y Meentemeyer, 2001; Sánchez González y López-Mata, 2005; Rong y Tong, 2012).

En el caso de *A. firma*, en la escala más amplia considerada en el presente estudio (que incluye las poblaciones de los dos municipios), la altitud fue la variable que permitió explicar de la mejor manera, las diferencias en la densidad poblacional. Sin embargo, la altitud es una variable ambiental indirecta, que representa en realidad una combinación compleja de variables, principalmente climáticas (temperatura y precipitación), a las cuales las especies responden (Körner, 2007; Richter, 2008). De acuerdo con esta información Bystriakova *et al.* (2011), mencionan que la humedad del aire y del suelo, la temperatura y otras condiciones ambientales que cambian con la altitud, pueden restringir la amplitud del hábitat de las especies de Cyatheaceae con menor capacidad de adaptación.

Los resultados del árbol de regresión indican que las seis poblaciones de *A. firma* con mayor número de individuos, se encuentran en altitudes de menos de 1,668 m, en la zona de transición del BHM con el bosque tropical (Álvarez *et al.*, 2012). Como el intervalo de distribución altitudinal más común del BHM de México está entre los 1,500 y 2,500 m (González-Espinosa *et al.*, 2011), es probable que las condiciones climáticas que prevalecen en el límite de distribución altitudinal inferior de este tipo de vegetación, sean favorables para el desarrollo exitoso de las poblaciones de *A. firma*. Acorde con lo anterior, algunos estudios (Mehltreter y García-Franco, 2008; Eleutério y Pérez-Salicrup, 2009) y datos recientes (CONABIO, 2012), indican que aunque

esta especie es común en el BHM, también puede desarrollarse en climas más cálidos, característicos del bosque tropical sub-caducifolio.

Las condiciones climáticas son consideradas como los principales factores limitantes de la distribución y abundancia de los helechos a escala continental y regional, mientras que los factores edáficos y micro-topográficos son considerados importantes en escalas locales (Landi y Angiolini, 2008; Alfonso-Moreno *et al.*, 2011). Los resultados del presente estudio son consistentes con esta afirmación, dado que a escala local (considerando sólo el subconjunto de poblaciones con mayor número de individuos), la pendiente del terreno y la cobertura del suelo, fueron las variables que mejor explican las diferencias en los valores de densidad poblacional en *A. firma*.

Con respecto a *C. fulva*, la cobertura del dosel fue la única variable relacionada con la densidad poblacional; este resultado llama la atención, porque el intervalo de variación de la cobertura arbórea fluctuó entre 89 y 99.5%. Sin embargo, el árbol de regresión sugiere que dentro de este pequeño intervalo de entrada de luz, pueden ocurrir cambios significativos en la densidad poblacional: valores de cobertura menores de 99.1% dieron como resultado 20.2 individuos en promedio; pero cuando la cobertura fue mayor de 99.1% sólo se encontraron 10 individuos en promedio. Dicho en otros términos, los resultados sugieren que “pequeñas” diferencias en la cantidad de luz, pueden ser determinantes en el éxito de las poblaciones de *C. fulva*. De cualquier forma, estos resultados deben tomarse con reserva, en el sentido de que los árboles de regresión representan herramientas estadísticas de análisis exploratorio sumamente útiles, para hacer inferencias ecológicas y para generar hipótesis que deben comprobarse en estudios experimentales posteriores (Sánchez-González y López-Mata, 2005; Kallimanis *et al.*, 2007).

Las adaptaciones a diferentes cantidades de luz han sido analizadas en varias especies de helechos arborescentes. En el caso particular del género *Cyathea* se han encontrado resultados

contrastantes: en algunas de las especies el tallo crece más rápido y produce más frondas y esporas en condiciones de luminosidad (Arens y Sanchez-Baracaldo, 2000; Arens, 2001) e incluso se ha observado que en *C. caracasana* no hay reclutamiento de esporofitos cuando el dosel es cerrado (Arens, 2001). En cambio, otras especies de Cyatheaceae (v. gr. *A. bryophila*, *A. firma*, *C. fulva* y *C. pubescens*) son consideradas como tolerantes, ya que son capaces de germinar, crecer y producir esporas bajo el dosel del bosque (Large y Braggins, 2004; Eleutério y Pérez-Salicrup, 2009; Bystriakova *et al.*, 2011). Los resultados del presente estudio indican que, aunque *C. fulva* es una especie esciófila, requiere de un poco de luz para establecerse y desarrollarse, pues cuando el dosel es cerrado, la densidad de individuos es baja. Bernabe *et al.* (1999) describen un comportamiento semejante para *C. pubescens*.

Recientemente, se ha señalado que la tolerancia a la sombra está determinada por numerosos factores bióticos (v. gr. la ontogenia de las plantas) y abióticos, entre los que sobresalen la disponibilidad de agua y nutrientes (Valladares y Niinemets, 2008). Acorde con lo anterior, en las dos especies de helechos arborescentes analizadas, se presentan adaptaciones fisiológicas y estructurales relacionadas con las condiciones de escasas de luz y elevada humedad (higrofilia) donde se desarrollan: hojas grandes, relación tallo y raíz desproporcionada a favor del primero y alta resistencia al flujo de agua (Watkins *et al.*, 2010).

Fenología foliar y edad de los individuos marcados

En las dos técnicas convencionales utilizadas en el presente estudio para estimar la edad de los helechos arborescentes (incremento en longitud del tallo y producción anual de hojas), se requiere de un monitoreo a largo plazo para que los resultados puedan ser considerados confiables, dado que el incremento en la longitud del tallo y la producción de hojas puede variar significativamente entre años consecutivos, debido a cambios en las condiciones ambientales

(Schmitt y Windisch, 2006; Mehltreter y García-Franco, 2008; Sharpe y Mehltreter, 2010; Schmitt y Windisch, 2012).

La presencia de individuos en todas las clases de tamaño, en la mayoría de las poblaciones analizadas, puede interpretarse como un indicio de que no han ocurrido cambios ambientales drásticos en el pasado (Mehltreter y García-Franco, 2008). Aun cuando los resultados obtenidos son parciales, porque el estudio fenológico abarcó un lapso corto de tiempo (18 meses), podrían ser cercanos a la realidad si se considera, hipotéticamente, que las condiciones ambientales han permanecido estables en las últimas décadas. En este escenario, en las dos especies analizadas la producción de hojas nuevas, vegetativas, fértiles y senescentes ocurrió durante todo el año, debido a la heterogeneidad en las respuestas a nivel individual. Este patrón continuo en la fenología foliar ha sido observado en varias especies de helechos arborescentes: en *C. pubescens* (Tanner, 1983), en Jamaica; en *C. spinulosa* (Nagano y Suzuki, 2007) en Japón; en *A. firma* (Mehltreter y García Franco, 2008) en México; y en *C. delgadii* (Schmitt y Windisch, 2007) y *Dicksonia sellowiana* (Schmitt *et al.*, 2009) en Brasil.

De cualquier forma, en las dos especies analizadas en el presente estudio, el número promedio de hojas nuevas que se produjeron difirió con respecto a la época del año. En *A. firma*, se registró en Marzo de 2011 y en Enero de 2012 (ambos considerados como meses con poca precipitación pluvial). En cambio, en *C. fulva* la mayor producción de hojas nuevas fue en Junio de 2011 y en Junio de 2012 (considerado un mes con alta precipitación pluvial: INIFAP, 2013). En otras especies de helechos arborescentes, como *C. pubescens* (Tanner, 1983) y *C. spinulosa* (Nagano y Suzuki, 2007), el mayor número de circinios se produce en primavera y verano; en *A. firma* ocurre sincrónicamente entre Junio y Septiembre (Mehltreter y García-Franco, 2008) y en *C. atrovirens* entre Junio y Noviembre, pero con un máximo en el mes de Septiembre (Schmitt y Windisch, 2012).

De acuerdo con los datos del párrafo anterior, en casi todas las especies referidas, la mayor producción de hojas nuevas ocurrió en los meses con precipitación pluvial alta (entre Junio y Noviembre), excepto en la población de *A. firma* de la localidad del Temazate. Esta respuesta “asincrónica” en la producción de hojas nuevas, puede deberse a que no hubo una temporada de sequía bien definida durante el tiempo en que se desarrolló el estudio. Las lluvias ocurrieron en prácticamente todos los meses del año en el municipio de Tlanchinol (INIFAP, 2013), como la humedad no fue un factor limitante para el desarrollo de los individuos de *A. firma*, es probable que otras variables abióticas (como la temperatura y la longitud del día) y/o bióticas (v. gr. competencia inter-específica con *C. fulva*), estén influyendo sobre la fenología foliar, como se ha sugerido en otras investigaciones (Schmitt y Windisch, 2012). De cualquier forma, los datos obtenidos en la presente investigación son insuficientes como para establecer un patrón fenológico, por lo que es necesario incrementar el periodo de estudio por varios años más (Ramírez-Valencia *et al.*, 2009; Sharpe y Mehlreter, 2010) e implementar un diseño de muestreo específico, que permita definir la relación entre la fenología foliar y los factores ambientales en las poblaciones de cada una de las especies.

Un resultado interesante del presente estudio es que existe una correlación (estadísticamente significativa) entre la altura de los individuos y el número de cicatrices foliares. Una de las críticas principales del uso de esta técnica es que se pueden encontrar sesgos en la estimación de la edad de los individuos, porque la producción de hojas puede variar significativamente entre años consecutivos, como consecuencia de cambios en las condiciones ambientales (Schmitt y Windisch, 2006; Sharpe y Mehlreter, 2010). Sin embargo, en ausencia de disturbios, los ambientes húmedos y templados típicos del BHM, en donde hay poca variación en las condiciones ambientales (Villaseñor, 2010; Bystriakova *et al.*, 2011), son idóneos para que ambas especies de helechos se establezcan y prosperen. En el presente estudio, el conteo de las

cicatrices foliares, permitió determinar una edad razonable para los individuos de *A. firma* y *C. fulva*, considerando que las edades estimadas, se encuentra dentro del intervalo de valores obtenido para otras especies de Cyatheaceae en distintas regiones del planeta (Sharpe y Mehlreter, 2010; Bystriakova *et al.*, 2011; Schmitt y Windisch, 2012).

Por otro lado, el crecimiento anual del tallo fue lento (de menos de 10 cm) en ambas especies, lo que es acorde con los valores estimados en otras especies de helechos arborescentes tolerantes a la sombra de los géneros *Alsophila*, *Cyathea* y *Dicksonia* (Arens y Baracaldo, 2000; Ramírez-Valencia *et al.*, 2009; Bystriakova *et al.*, 2011) y se debe principalmente a la escasez de luz solar disponible para los individuos. Acorde con lo antes mencionado, algunos autores opinan que las especies tolerantes a la sombra *A. bryophila* (Large y Braggins, 2004), *A. firma* y *C. fulva* (Eleutério y Pérez Salicrup, 2008), pueden mantener una tasa de crecimiento lenta, pero constante bajo el dosel del bosque.

El conocimiento de cómo el tamaño y la estructura de las poblaciones están relacionados con las condiciones ambientales, es particularmente relevante en el caso de *A. firma* y *C. fulva*, porque ambas especies están protegidas por la legislación mexicana (SEMARNAT, 2010), incluidas en la categoría de “sujetas a protección especial”. Los resultados obtenidos en el presente estudio indican que el establecimiento y supervivencia a largo plazo de las poblaciones de ambas especies de helechos arborescentes, depende en gran medida de la conservación del BHM, debido a que, por su adaptación a la sombra, requieren de la existencia de cierto grado de cobertura vegetal.

LITERATURA CITADA

- Agurauja R., Zobel M., Zobel K. y Moora M. 2008. Conservation of the endemic fern lineage *Diellia* (Aspleniaceae) on the Hawaiian Islands: can population structure indicate regional dynamics and endangering factors? *Folia Geobotanica* **43**: 3-18.
- Alfonso-Moreno R.A., Cadena-Vargas C.E., Morales G., Peña N. y Pérez B. 2011. Conservación integral de *Dicksonia sellowiana* Hook., en Bogotá D.C. y su área de influencia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias* **35**: 79-96.
- Álvarez-Zúñiga E., Sánchez-González A., López-Mata L. y Tejero-Díez J.D. 2012. Composición y abundancia de las pteridofitas en el bosque mesófilo de montaña del municipio de Tlanchinol, Hidalgo, México. *Botanical Sciences* **90**: 163-177.
- Arens C.N. y Baracaldo S.P. 2000. Variation in tree fern stipe length with canopy height: tracking preferred habitat through morphological change. *American Fern Journal* **90**: 1-15.
- Bernabe N., Williams-Linera G. y Palacios-Ríos M. 1999. Tree ferns in the interior and at the edge of a Mexican cloud forest remnant: Spore germination and sporophyte survival and establishment. *Biotropica* **31**: 83-88.
- Bittner J. y Breckle S.W. 1995. The growth rate and age of the tree-fern trunks in relation to habitat. *American Fern Journal* **85**: 37-42.
- Bystriakova N., Schneider H. y Coomes D. 2011. Evolution of the climatic niche in scaly tree ferns (Cyatheaceae, Polypodiopsida). *Botanical Journal of the Linnean Society* **165**: 1-19.
- CITES (Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres) (2010). Disponible en: www.cites.org (consultado el 21 de junio de 2012).
- Condit R., Ashton P.S., Baker P., Bunyavejchewin S., Gunatilleke S., Gunatilleke N., Hubbell S.P., Foster R.B., Itoh A., LaFrankie J.V., Lee H.S., Losos E., Manokaran N., Sukumar R.

- y Yamakura T. 2000. Spatial patterns in the distribution of tropical tree species. *Science* **288**: 1414-1418.
- Cooper N., Jetz W. y Freckleton R.P. 2010. Phylogenetic comparative approaches for studying niche conservatism. *Journal of Evolutionary Biology* **23**: 2529-2539.
- Cruz-Cárdenas G., Villaseñor J.L., López-Mata L. y Ortíz E. 2012. Potential distribution of humid mountain forest in Mexico. *Botanical Sciences* **90**: 331-340.
- Eleutério A.A. y Pérez-Salicrup D. 2009. Transplanting tree ferns to promote their conservation in Mexico. *American Fern Journal* **99**: 279-291.
- Hanski I. y Simberloff D. 1997. The metapopulation approach, its history, conceptual domain, and application to conservation. En: Hanski I, Gilpin M. E. Eds. *Metapopulation biology*, pp- 5-26, Academic Press, San Diego.
- INIFAP. Instituto Nacional de Investigación Forestal, Agrícola y Pecuaria. 2013. Red Nacional de Estaciones Estatales Agroclimatológicas. Laboratorio Nacional de Modelaje y Sensores Remotos 2003. Consultada 31 de Enero de 2013. <http://clima.inifap.gob.mx/redclima/historicos.aspx>
- IUCN. 2008 IUCN Red List of Threatened Species. www.iucnredlist.org. Revisada en Marzo 2011.
- Jones M.M., Olivas R.P., Tuomisto H. y Clark D.B. 2007. Environmental and neighbourhood effects on tree fern distributions in a neotropical lowland rain forest. *Journal of Vegetation Science* **18**: 13-24.
- Kallimanis A.S., Ragia V., Sgardis S.P. y Pantis J.D. 2007. Using regression trees to predict alpha diversity based upon geographical and habitat characteristics. *Biodiversity and Conservation* **16**: 3863-3876.

- Kingston N., Waldren S. y Smyth N. 2004. Conservation genetics and ecology of *Angiopteris chauliodonta* Copel. (Marattiaceae), a critically endangered fern from Pitcairn Island, South Central Pacific Ocean. *Biological Conservation* **117**: 309-319.
- Kluge J. y Kessler M. 2006. Fern endemism and its correlates: contribution from an elevational transect in Costa Rica. *Diversity and Distributions* **12**: 535-54.
- Körner C. 2007. The use of 'altitude' in ecological research. *Trends in Ecology and Evolution* **22**: 569-574.
- Landi M. y Angiolini C. 2008. Habitat characteristics and vegetation context of *Osmunda regalis* L. at the southern edge of its distribution in Europe. *Botanica Helvetica* **118**: 45-57.
- Large M.F. y Braggins J.E. 2004. Tree ferns. Timber Press, Portland, EUA.
- Mehltreter K. y García-Franco J.G. 2008. Leaf phenology and trunk growth of the deciduous tree fern *Alsophila firma* (Baker) D. S. Conant in a lower montane mexican forest. *American Fern Journal* **98**:1-13.
- Mehltreter K. 2010. Fern Conservation. En: Mehltreter K., Walker R.L. y Sharpe M.J. Eds. *Fern Ecology*, pp. 323-359, Cambridge University Press. USA.
- Moody A. y Meentemeyer R.K. 2001. Environmental factors influencing spatial patterns of shrub diversity in Chaparral, Santa Ynez Mountains, California. *Journal of Vegetation Science* **12**: 41-52.
- Nagano T. y Suzuki E. 2007. Leaf demography and growth pattern of the tree fern *Cyathea spinulosa* in Yakushima Island. *Tropics* **16**: 47-57.
- Ough K. y Murphy A. 2004. Decline in tree-fern abundance after clearfell harvesting. *Forest Ecology and Management* **199**: 153-163.
- Pérez-Paredes M.G., Sánchez-González A. y Tejero-Díez J.D. 2012. Listado de licopodios y helechos del municipio de Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo, México. *Polibotánica* **33**: 57-73.

- Plotkin J.B., Potts M.D., Leslie N., Manokaran N., LaFrankie J. y Ashton P.S. 2000. Species-area curves, spatial aggregation, and habitat specialization in tropical forests. *Journal of Theoretical Biology* **207**: 81-99.
- Ponce-Reyes R., Reynoso-Rosales V.H., Watson M.J.E., VanDerWal J., Fuller A.R., Pressey L.R. y Possingham P.H. 2012. Vulnerability of cloud forest reserves in Mexico to climate change. *Nature Climate Change* 1-5.
- Price C.A. y Weitz J.S. 2012. Allometric covariation: a hallmark behavior of plants and leaves. *New Phytologist* **193**: 882-889.
- Ramírez-Barahona S.A., Luna-Vega I. y Tejero-Díez D. 2011. Species richness, endemism, and conservation of American tree ferns (Cyatheales). *Biodiversity and Conservation* **20**: 59-72.
- Richter M. 2008. Tropical Mountain forests – distribution and general features. *The Biodiversity and Ecology Series* **2**: 7-24.
- Rodríguez-Ramírez E.Ch., Sánchez-González A. y Ángeles-Pérez G. 2013. Current distribution and extension of Mexican beech forests (*Fagus grandifolia* subsp. *mexicana*) in Mexico. *Endangered Species Research* **20**:xx-xx.
- Rong Z. y Tong L. 2012. Plant species diversity and community classification in the southern Gurbantungut Desert. *Acta Ecologica Sinica* **32**: 6056-6066.
- Rzedowski J. 2006. Vegetación de México. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, 504 pp.
- Sánchez-González A. y López-Mata L. 2005. Plant species richness and diversity along an altitudinal gradient in the Sierra Nevada, Mexico. *Diversity and Distribution* **11**: 567-575.

- Schmitt J.L., Schneider P.H. y Windisch P.G. 2009. Crescimento do cáudice e fenologia de *Dicksonia sellowiana* Hook. (Dicksoniaceae) no sul do Brasil. *Acta Botanica Brasilica* **23**: 282-291.
- Schmitt J.L. y Windisch P.G. 2006. Growth rates and age estimates of *Alsophila setosa* Kaulf. In Southern Brazil. *American Fern Journal* **96**: 103-111.
- Schmitt J.L. y Windisch P.G. 2007. Estrutura populacional e desenvolvimento da fase esporofítica de *Cyathea delgadii* Sternb. (Cyatheaceae, Monilophyta) no sul do Brasil. *Acta Botanica Brasilica* **21**: 731-740.
- Schmitt J.L. y Windisch P.G. 2012. Caudex growth and phenology of *Cyathea atrovirens* (Langsd. & Fisch.) Domin (Cyatheaceae) in secondary forest, southern Brazil. *Brazilian Journal of Biology* **72**: 397-405.
- SEMARNAT. 2010. Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. Diario Oficial de la Federación, México.
- Sharpe J.M. y Mehltreter K. 2010. Ecological insights from fern population dynamics. En: Mehltreter K., Walker R.L. y Sharpe M.J. Eds. *Fern Ecology*. Pp. 62-110, Cambridge University Press. USA.
- StatSoft, Inc. 2010. Electronic Statistics Textbook. Tulsa, OK. StatSoft.
- Tanner E.V.J. 1983. Leaf demography and growth of tree-fern *Cyathea pubescens* Mett. Ex Kuhn in Jamaica. *Botanical Journal of the Linnean Society* **87**: 213-227.
- Valladares F. y Niinemets Ü. 2008. Shade tolerance, a key plant feature of complex nature and consequences. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* **39**: 237-257.
- Vandermeer H.J. y Goldberg E.D. 2003. Population Ecology First Principles. Princeton University Press. 273 pp. New Jersey.

Villaseñor J.L. 2010. El bosque húmedo de montaña en México y sus plantas vasculares: catálogo florístico-taxonómico. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 40 pp. México, D.F.

Watkins J.E., Holbrook M.N. y Zwieniecki M.A. 2010. Hydraulic properties of fern sporophytes: consequences for ecological and evolutionary diversification. *American Journal of Botany* **97**: 2007-2019.

ANEXOS

ANEXO I. Ubicación geográfica (coordenadas UTM) de las poblaciones de Cyatheaceae evaluadas en el presente estudio

Especie	X	Y	Sitio	Municipio
<i>A. firma</i>	540510.0167	2324423.958	La Quebradora	Tlanchinol
	536903	2325410	El Temazate	Tlanchinol
	577365.2824	2257431.697	Los Comales	San Bartolo Tutotepec
	577648	2257500	Los Comales II	San Bartolo Tutotepec
<i>C. fulva</i>	536903	2325410	El Temazate	Tlanchinol
	540428	2320053	La Bomba	Tlanchinol
	579920.9758	2256942.338	Medio Monte	San Bartolo Tutotepec
	574999.3549	2256979.735	Tutotepec	San Bartolo Tutotepec

CAPÍTULO III

Distribución actual y potencial de dos especies de Cyatheaceae en el
estado de Hidalgo

RESUMEN

La familia Cyatheaceae está constituida por cerca de 500-600 especies de helechos arborescentes, de las cuales se reconocen 14 para México. Dos de las especies: *Alsophila firma* y *Cyathea fulva*, resaltan por su afinidad ecológica y patrón de distribución, restringido casi exclusivamente al bosque húmedo de montaña (BHM) de México, por lo que se ha postulado que tienen una historia biogeográfica semejante y que pueden utilizarse como indicadores de la presencia de este ecosistema. Dado que ambas especies, así como su hábitat característico (el BHM), se encuentran en riesgo de desaparecer, en el presente estudio se planteó como objetivo principal el uso de modelos de nicho ecológico para: (1) estimar la distribución potencial actual de las dos especies en el estado de Hidalgo, (2) definir cuáles son las variables ambientales más estrechamente relacionadas con su distribución y, (3) hacer predicciones a futuro (año 2050) del efecto del cambio climático sobre la distribución de las dos especies, bajo dos escenarios hipotéticos de cambio, uno conservador y otro drástico. El modelo de distribución potencial de *A. firma* la coloca en las zonas ecológicas templada sub-húmeda, templada húmeda y tropical húmeda (en esta última zona la especie es común). Con respecto a *C. fulva*, se encuentra en las mismas zonas ecológicas, pero su distribución es más restringida, a manera de pequeños parches. Las variables que resultaron más importantes en la explicación del modelo de distribución fueron: la precipitación total anual para *A. firma* y la precipitación del trimestre más seco para *C. fulva*. Considerando la alta fidelidad de las poblaciones de ambas especies de helechos con respecto del BHM, los modelos de distribución potencial para el año 2050, podrían estar prediciendo en realidad, la extensión de pérdida del hábitat de las especies dentro de este ecosistema, la cual se estimó entre 28% y 50% bajo el escenario conservador, y para el drástico alcanzó hasta el 79%.

INTRODUCCIÓN

Conocer la distribución actual de las especies es esencial para desarrollar estrategias para la conservación de la biodiversidad. La predicción y mapeo del hábitat potencial disponible para las especies en peligro de extinción o que se encuentran en cualquier otra categoría de riesgo, es crítico para el monitoreo y restauración de sus poblaciones, para realizar introducciones artificiales y/o en la selección de sitios para la conservación y manejo (Elith *et al.*, 2006; Peterson, 2006; Kumar y Stohlgren, 2009).

Los modelos de distribución de especies (MDE) tienen como objetivo principal examinar las relaciones entre los datos de presencia de una especie en particular y las características ambientales (Contreras-Medina *et al.*, 2010). Estos modelos permiten, entre otras cosas, hacer proyecciones sobre la distribución potencial de las especies hacia otras regiones que no han sido exploradas y tienen múltiples aplicaciones en diferentes áreas del conocimiento, tales como ecología (Jayat *et al.*, 2009; Kumar y Stohlgren, 2009; Contreras-Medina *et al.*, 2010), biogeografía (Smith y Donoghue, 2010), sistemática (Bystriakova *et al.*, 2011) y biología de la conservación (Elith *et al.*, 2011).

Los MDE relacionan la distribución geográfica conocida de las especies con variables climáticas, edáficas y/o topográficas, principalmente; para caracterizar ambientes en donde potencialmente pueden vivir, asumiendo que la distribución conocida de una determinada especie proporciona información suficiente para describir sus requerimientos ecológicos (Feria-Arroyo *et al.*, 2011).

La familia Cyatheaceae está constituida por alrededor de 500-600 especies de helechos arborescentes (Smith *et al.*, 2008), tiene actualmente una distribución relictual pero conspicua, dentro de la latitud tropical y subtropical de la zona templado húmeda de montaña del mundo (Arens, 2001; Korall *et al.*, 2007; Smith *et al.*, 2008).

Actualmente se reconocen 14 especies de Cyatheaceae para México, dos de ellas: *Alsophila firma* y *Cyathea fulva*, presentan un patrón de distribución amplio dentro de las principales cadenas montañosas, pero están restringidas principalmente a los fragmentos de los BHM (Mickel y Smith, 2004). Por su distribución y afinidad ecológica, se ha postulado que ambas especies de helechos arborescentes tienen una historia biogeográfica semejante y que pueden ser utilizadas como indicadores de la presencia de los BHM (Mehltreter y García-Franco, 2008; Ramírez, 2009).

La distribución de los bosques húmedos de montaña (BHM) está condicionada principalmente por la presencia de nubes, por lo que se desarrollan en sitios donde existe un intervalo óptimo de valores de temperatura y humedad atmosférica (Luna-Vega *et al.*, 2001; Urrego *et al.*, 2005; Villaseñor, 2010). Los BHM ocupan sólo el 0.6 % del territorio de México y se localizan dentro de una franja altitudinal estrecha (Rzedowski, 1978); el estado de Hidalgo posee el tercer lugar a nivel nacional después de Oaxaca y Chiapas, y el primero dentro de la Sierra Madre Oriental, en cuanto a superficie ocupada por BHM (Luna-Vega *et al.*, 2000).

El uso de los MDE como herramienta para conocer la distribución espacial en helechos no ha sido muy explorada, sólo se cuenta con un estudio en los bosques templados de Bolivia que evalúa el impacto que suele tener en los resultados de la distribución de las especies en la elección de un modelo climático u otro (Soria-Auza *et al.*, 2010). En cuanto a otros grupos de plantas característicos del BHM, Téllez-Valdés *et al.* (2006) analizaron, bajo el enfoque del modelado de nicho ecológico y cambio climático, la distribución de *Fagus grandifolia*. Los resultados indican una drástica contracción en la distribución de esta especie y que la mayoría de las poblaciones remanentes, quedarán fuera de algún Área Natural Protegida.

Considerando que tanto los helechos arborescentes *Alsophila firma* y *Cyathea fulva* como su hábitat característico (el BHM), se encuentran en riesgo de desaparecer, principalmente como

consecuencia de las actividades humanas (CONABIO, 2010; SEMARNAT, 2010; Villaseñor, 2010; González-Espinosa *et al.*, 2012), en el presente estudio se plantearon los siguientes objetivos: con base en el uso de modelos de nicho ecológico (1) estimar la distribución potencial actual de las dos especies de Cyatheaceae, en el estado de Hidalgo; (2) definir cuáles son las variables ambientales más estrechamente relacionadas con la distribución potencial de las dos especies y; (3) hacer predicciones a futuro (hacia el año 2050), sobre el efecto que tendrá el cambio climático en la distribución potencial de las dos especies, considerando dos escenarios hipotéticos de cambio, uno conservador y otro drástico.

MÉTODO

Los registros de distribución geográfica de las especies de Cyatheaceae en Hidalgo se obtuvieron principalmente de la base de datos del Herbario HGOM de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo y del trabajo de campo del presente estudio. Adicionalmente, se utilizaron bases de datos provenientes de la CONABIO, en las que no se verificó la identificación de las especies porque se consideró que *A. firma* y *C. fulva* son relativamente sencillas de identificar y de diferenciar entre sí (Luna-Vega, 1997, 1999, 2000; Gutiérrez Garduño, 1999; Lorea-Hernández *et al.*, 2000; Rzedowski y Zamudio, 2001; Panero y CONABIO, 2003). El número total de registros (coordenadas geográficas) de presencia para *A. firma* fue de 15 y para *C. fulva* de 21.

Para la modelación de la distribución de las especies, se utilizaron las capas de 19 variables climáticas disponibles en la página web de Worldclim (<http://www.worldclim.org/>) y cuatro capas topográficas provenientes del Servicio Geológico de los Estados Unidos (<http://eros.usgs.gov/gtopo30/hydro>) (Anexo 1), todas a una resolución espacial aproximada de 1 km² (Soria-Auza *et al.*, 2010; López-Mata *et al.*, 2012).

La estimación de la distribución potencial futura se basó en el mismo número de capas climáticas y topográficas antes mencionadas, pero con proyecciones para el año 2050. Se utilizaron dos escenarios de cambio climático elaborados por el Centro Climático Canadiense (http://www.ipcc-data.org/sres/gcm_data.html): en el escenario “drástico” (A2), el planeta es muy heterogéneo, con alto crecimiento poblacional, desarrollo económico regionalizado, con incremento las emisiones de CO₂ y el aumento en la temperatura es de entre 3.0 y 5.2°C; en el escenario “conservador” (B2), se plantea un mundo donde se aplican soluciones sustentables en el aspecto social, económico, ambiental y la temperatura aumenta entre 2.1 y 3.9°C (Ballesteros-Barrera *et al.*, 2007).

La modelación de la distribución potencial de las dos especies de Cyatheaceae en el estado de Hidalgo, se realizó con el programa de cálculo MaxEnt v3.3.3k (Phillips *et al.*, 2006). Se eligió la opción de 20 réplicas para cada especie, debido a que MaxEnt produce resultados diferentes de una corrida a la siguiente, por la asignación aleatoria de la misma entrada de datos durante el proceso de modelación (Elith *et al.*, 2011). Se seleccionó el 25 % de los registros para generar el modelo (entrenamiento) y el 75 % restante se utilizó para la validación del mismo (Pearson *et al.*, 2007).

Una vez que se obtuvieron los modelos, se eliminaron aquellas variables con una contribución mínima, es decir, aquellas que no produjeron un decrecimiento mayor a 0.01 en la ganancia de entrenamiento, dada su baja o nula contribución al ajuste del modelo, según la prueba de Jackknife, incluida en el programa MaxEnt (Pearson *et al.*, 2007; Torres y Jayat, 2010).

Las variables que contribuyeron más al ajuste de los modelos, fueron examinadas mediante un análisis de correlación. Los valores de cada una de ellas para cada punto de ocurrencia se extrajeron de las capas, utilizando el programa DIVA-GIS (Hijmans *et al.*, 2012); a partir de la matriz de datos obtenida se estimó el coeficiente de correlación de Pearson entre las variables

utilizando el programa SAM (Spatial Analysis in Macroecology; Rangel *et al.*, 2010), aquellas que presentaron valores de r 0.8 fueron examinadas consultando los resultados de MaxEnt, y se eliminaron las que mostraron menor contribución en la ganancia general del modelo al ser omitidas.

Con el subconjunto de variables elegidas (menos correlacionadas), se modeló nuevamente la distribución potencial de ambas especies, obteniéndose 13 réplicas para *A. firma* y 20 para *C. fulva*. El mapa con el valor de probabilidad promedio de distribución de cada una de las especies fue exportado al programa Arc View 3.3 (ESRI, 2002), para convertirlo en un mapa de presencia-ausencia, utilizando como umbral de corte el valor de 10 percentil (Liu *et al.*, 2005; Jiménez-Valverde y Lobo, 2007).

Se utilizó el valor del área bajo la curva (AUC: Area Under the Curve) para evaluar la eficiencia de los modelos para predecir la distribución de las especies (Baldwin, 2009), de acuerdo con Siles *et al.* (2004) y Torres y Jayat (2010), la capacidad de predicción de un modelo en función de los valores de AUC es: 0.5-0.6= mala; 0.6-0.7= pobre; 0.7-0.8= satisfactoria; 0.8-0.9= buena y 0.9-1.0= excelente.

Datos de distribución actual de las especies

Alsophila firma se distribuye principalmente en BHM, en altitudes de 600-2,500 m. En México se encuentra en los estados de Chiapas, Estado de México, Hidalgo, Oaxaca, Puebla, Querétaro de Arteaga, San Luis Potosí y Veracruz de la Llave (Luna-Vega, 1997; Lorea-Hernández *et al.*, 2000; Luna-Vega, 2000; Mickel y Smith, 2004). En el estado de Hidalgo ha sido recolectada en los municipios de Calnali, San Bartolo Tutotepec, Tenango de Doria, Tlanchinol, Xochicoatlán y Zacualtipán de Ángeles entre 1,100 y 1,900 m snm (Sánchez-González, datos no publicados).

Cyathea fulva se distribuye principalmente en BHM en altitudes de 800-2,700 m y hasta 3,250 m. En México se encuentra en los estados de Chiapas, Estado de México, Guerrero, Hidalgo, Oaxaca, Puebla, San Luis Potosí y Veracruz (Luna-Vega, 1997, 1999, 2000; Gutiérrez Garduño, 1999; Rzedowski y Zamudio, 2001; Panero y CONABIO, 2003; Mickel y Smith, 2004). En el estado de Hidalgo ha sido recolectada en los municipios de Molango, San Bartolo Tutotepec, Tenango de Doria, Tlanchinol, Xochicoatlán y Zacualtipán de Ángeles, entre 1,300 y 1,900 m snm (Sánchez-González, datos no publicados).

RESULTADOS

Distribución potencial actual

Los modelos de distribución potencial en ambas especies mostraron un desempeño excelente en cuanto a su capacidad de predicción, de acuerdo con el criterio de Siles *et al.* (2004) y Torres y Jayat (2010), con valores de AUC superiores a 0.97.

En el caso de *A. firma* se identificaron siete variables con alta contribución en el ajuste final del modelo, destacando la precipitación anual (BIO12) con el valor más alto de contribución. Con respecto a *C. fulva* la precipitación del trimestre más seco (BIO17) fue una de las cuatro variables con mayor contribución en el ajuste del modelo final seleccionado. Es importante destacar que BIO 17 y el índice topográfico fueron seleccionadas como variables importantes en los modelos de distribución de ambas especies (Cuadro 4).

Cuadro 4. Porcentaje de contribución de las variables seleccionadas y valores de AUC de cada modelo, por especie de Cyatheaceae

Variables	Porcentaje de contribución	
	<i>A. firma</i>	<i>C. fulva</i>
Bio 12. Precipitación anual	34	----
Bio 13. Precipitación del mes más húmedo	28.5	----
Bio 6. Temperatura mínima del mes más frío	10.5	----
Índice topográfico	8.8	2.5
Bio 17. Precipitación del trimestre más seco	6.4	36.5
Bio 16. Precipitación del trimestre más húmedo	5.8	----
Bio 14. Precipitación del mes más seco	2.8	----
Bio 10. Temperatura media del trimestre más cálido	----	27.5
Bio 19. Precipitación del trimestre más frío	----	24.7
AUC	0.971	0.987

El modelo de distribución potencial de *A. firma*, con un umbral de probabilidad de presencia mayor de 0.349, incluye tres de las seis zonas ecológicas propuestas por Toledo y Ordóñez (2009) para el estado de Hidalgo: templada sub-húmeda, templada húmeda y tropical húmeda, pero la especie tiene una distribución más amplia hacia la zona tropical húmeda. El área potencial que predice el modelo para *A. firma* es de 902.05 km², lo que equivale al 4.33% de la superficie estatal (Figura 8).

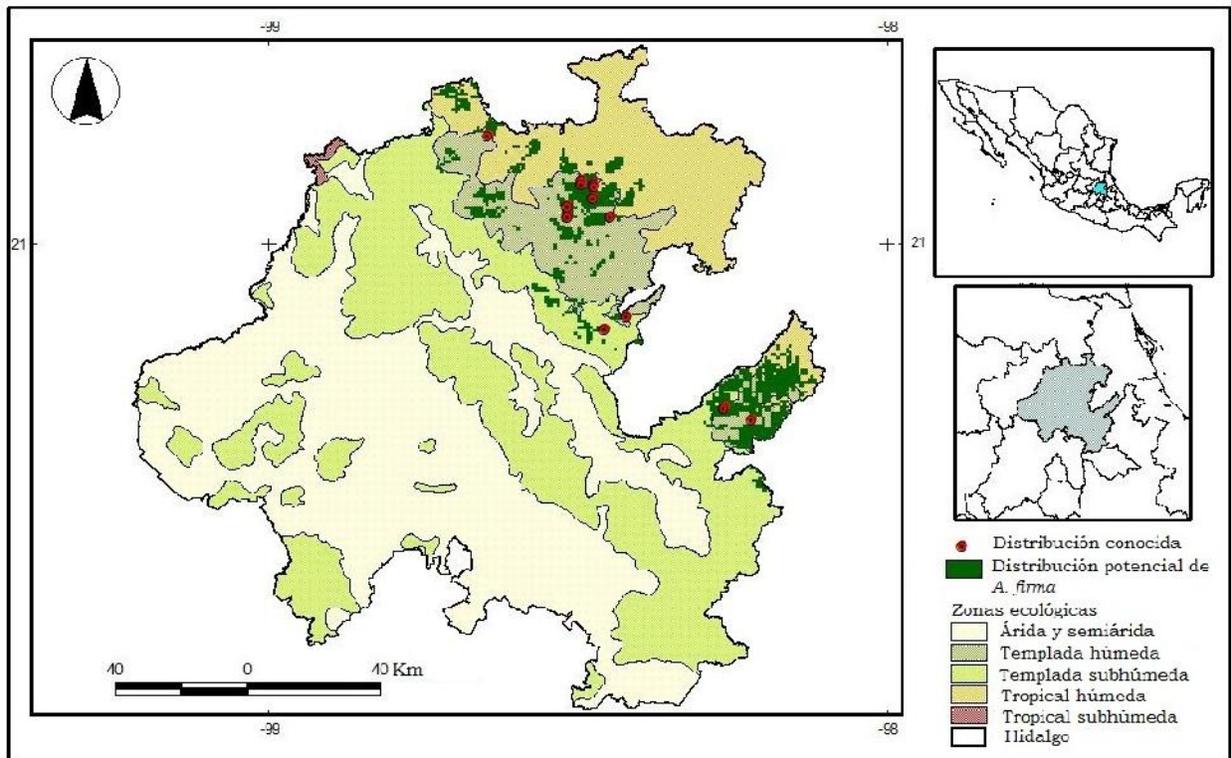


Figura 8. Distribución actual (presencia) y potencial de *A. firma* en el estado de Hidalgo

En *C. fulva* se consideró un umbral de corte para definir la probabilidad de presencia de más de 0.336, el modelo muestra que la especie tiene una distribución restringida, a manera de pequeños parches en las mismas zonas ecológicas en que se encuentra *A. firma*: templada subhúmeda, templada húmeda y tropical húmeda, *sensu* Toledo y Ordóñez (2009). El área que se

predice en el caso de *C. fulva* es de 571.48 Km², cantidad equivalente al 2.74 % del territorio del estado de Hidalgo (Figura 9).

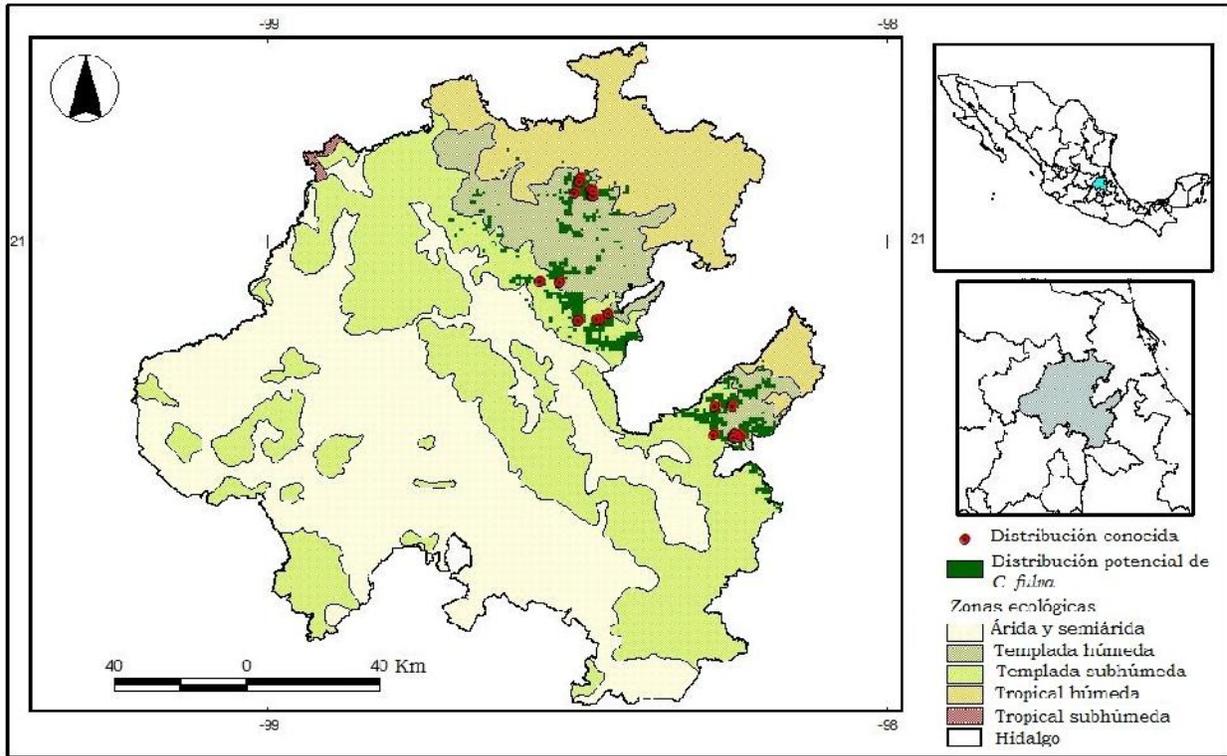


Figura 9. Distribución actual (presencia) y potencial de *C. fulva* en el estado de Hidalgo

De acuerdo con su distribución, las dos especies podrían coexistir en la entidad en un área de aproximadamente 292.14 Km² (Figura 10). Esta área compartida o de traslape, se localiza dentro de la zona ecológica templada húmeda, en donde el BHM es el tipo de vegetación característico.

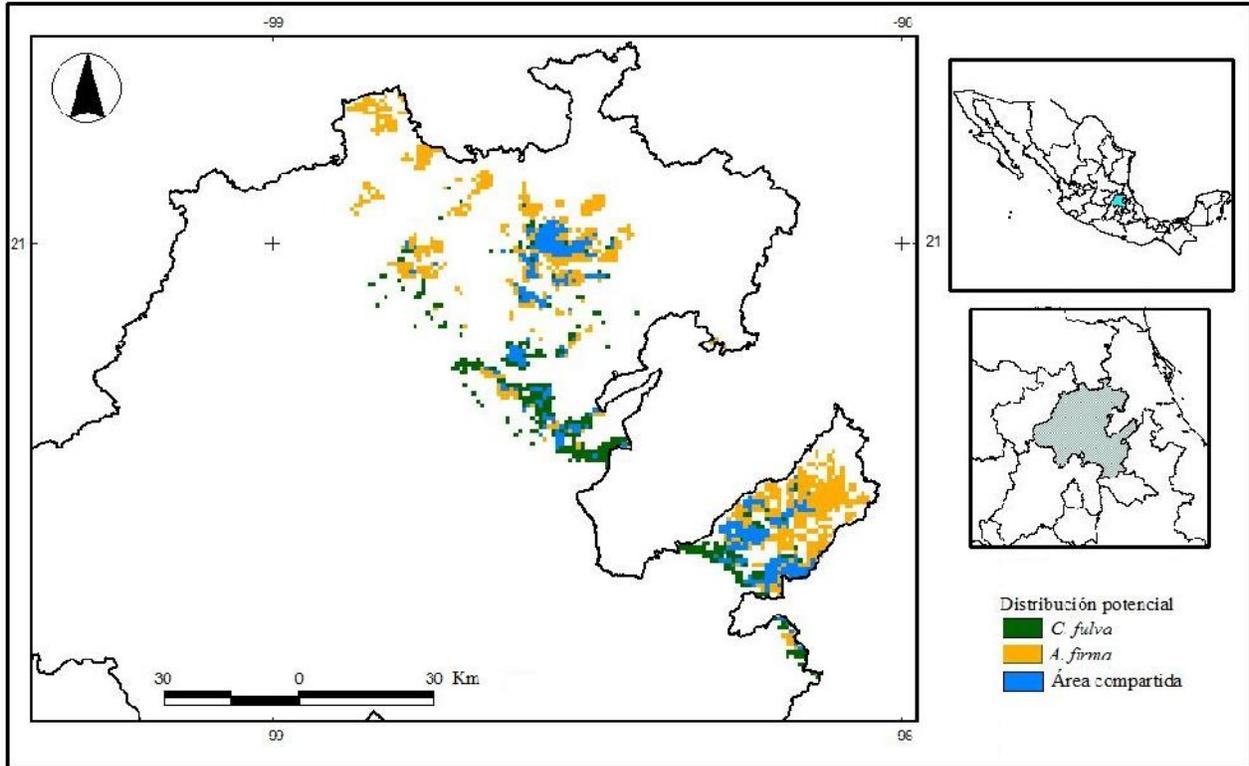


Figura 10. Área de traslapo de *A. firma* y *C. fulva* de acuerdo con su distribución potencial actual en el estado de Hidalgo

Distribución potencial bajo escenarios de cambio climático

Los modelos de distribución de *A. firma* para el año 2050, difirieron en más de dos órdenes de magnitud: en el escenario conservador, el área que ocuparía la especie se reduce 28%, pero en el escenario de cambio climático drástico, el área de distribución se reduce 79%, con respecto a la distribución potencial actual (Figura 4).

Los modelos de distribución potencial de *C. fulva* para el año 2050 resultaron similares en los dos escenarios considerados: en el escenario drástico se esperaba una reducción de 51% con respecto al área potencial actual, mientras que en el conservador la pérdida sería de 50% (Figura 11).

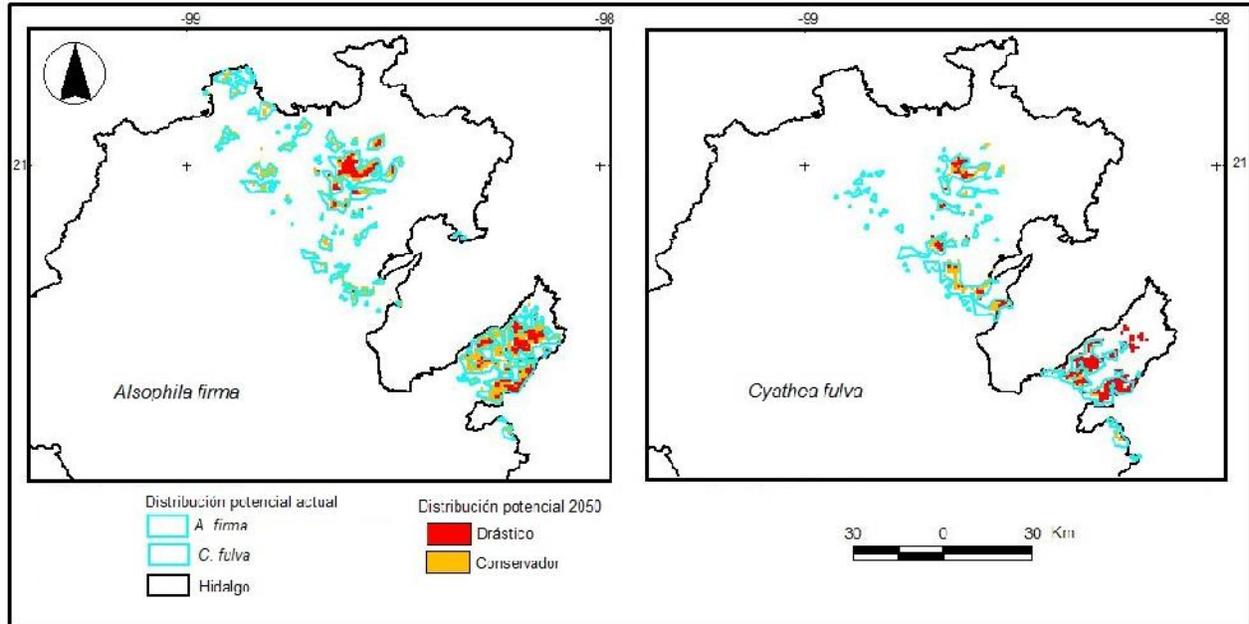


Figura 11. Distribución potencial de *A. firma* y *C. fulva* en el estado de Hidalgo para el año 2050, bajo dos escenarios de cambio climático. A2: escenario drástico y B2: escenario conservador.

DISCUSIÓN

Los datos a nivel mundial indican que las especies de Cyatheaceae, están estrechamente asociadas con los bosques húmedos de montaña. El patrón general de distribución y abundancia de estos helechos sugiere un alto conservadurismo del nicho filogenético, hacia las condiciones ambientales características de los trópicos húmedos: temperaturas cálidas, combinadas con alta humedad y variación estacional escasa, tanto en temperatura como en precipitación (Large y Braggins, 2004; Bystriakova *et al.*, 2011).

En México las poblaciones de las distintas especies de Cyatheaceae se desarrollan en regiones montañosas, aunque pueden hallarse dentro de encinares y bosques de pino-encino, es en los manchones del BHM donde tienen una distribución continua, preferentemente en ambientes riparios (Mickel y Smith, 2004). Los datos de algunos ejemplares botánicos de Cyatheaceae recolectados en distintas regiones de la República Mexicana, indican que algunas especies también pueden crecer en bosque tropical perennifolio (en el caso de *A. firma*).

En el estado de Hidalgo se han recolectado ejemplares y se han detectado poblaciones de *A. firma* exclusivamente en BHM. Sin embargo, los resultados del presente estudio indican que su distribución puede extenderse hacia la zona tropical húmeda de la entidad. En esta zona ecológica, la temperatura oscila entre 20°C y 26°C, las temperaturas mínimas son mayores de cero y la precipitación total anual es elevada: entre 1,500 y 3,000 mm (Challenger, 1998).

Los registros de recolectas de ejemplares de *A. firma* en México, validan el modelo de distribución potencial obtenido para el estado de Hidalgo, en el sentido de que corroboran que la especie puede ocupar una gama de ambientes más amplia, dentro de los que se incluyen distintos tipos de vegetación: BHM, bosque de *Quercus*, bosque de *Quercus-Pinus*, bosque tropical perennifolio y bosque tropical sub-caducifolio (Luna-Vega, 1977; Lorea-Hernández *et al.*, 2000; Luna-Vega, 2000).

Con respecto a *C. fulva*, en el estado de Hidalgo sólo se han recolectado ejemplares dentro de la zona ecológica templada húmeda, en BHM. Sin embargo, el MDE predice que puede encontrarse también en la zona templada sub-húmeda, que incluye como tipos de vegetación principal a los bosques de coníferas y de *Quercus*. Esta proyección del modelo, es consistente con el patrón de distribución actual de la especie en México; aunque la mayoría de los ejemplares se han recolectado en BHM, algunos provienen de sitios colindantes: bosque de *Quercus* y bosque de *Pinus-Quercus*, que se desarrollan dentro de las principales regiones montañosas del país, en condiciones donde la precipitación anual fluctúa entre 600 y 1,200 mm (durante la temporada de lluvias) y la temperatura media anual va de los 6 a los 28°C (Challenger, 1998).

Este patrón de distribución local o estatal de ambas especies de helechos arborescentes, es acorde con el que se ha encontrado a escala global para las especies de Cyatheaceae, ya que la mayoría están restringidas a regiones en las cuales la temperatura raramente alcanza el punto de congelación y la precipitación pluvial es alta y está equitativamente repartida a lo largo del año (Bystriakova *et al.*, 2011).

Las condiciones climáticas representan los principales factores abióticos que limitan la distribución de los helechos, en distintas escalas espaciales: locales, regionales, nacionales y continentales (Ferrer-Castán y Vetaas, 2005; Bickford y Laffan, 2006; Kluge *et al.*, 2006; Sanginés-Franco *et al.*, 2011; Cuevas *et al.*, 2013). En el presente estudio, las variables que aportaron una mayor contribución a la explicación del modelo de distribución en ambas especies de helechos arborescentes, están relacionadas con la disponibilidad de agua: la precipitación anual (BIO 12) resultó ser la más significativa para *A. firma* y la precipitación del trimestre más seco (BIO 17), lo fue para *C. fulva*. Estos resultados son consistentes con los de los estudios antes referidos y se relacionan directamente con los requerimientos del gametofito para completar la

fertilización, que depende en gran medida de la disponibilidad de agua en el ambiente (Page, 2002; Large y Braggins, 2004; Karst *et al.*, 2005; Bystriakova *et al.*, 2011).

El grado en que las especies reflejan las características de su hábitat es particularmente evidente en los helechos, por lo que han sido considerados en diferentes estudios como indicadores de la calidad del hábitat, de condiciones edáficas, de la presencia de otros grupos de plantas, tipos de vegetación, e incluso, del grado de conservación de los ecosistemas (Salovaara *et al.*, 2004; Arcand y Ranker, 2008; Cuevas *et al.*, 2013). Los resultados del presente estudio corroboran que existe una alta fidelidad de los helechos arborescentes con respecto a su hábitat, el BHM. Las condiciones de elevada humedad ambiental, temperatura moderada y escasa temporalidad que caracterizan a este tipo de vegetación proveen la mejor oportunidad para que *A. firma* y *C. fulva* se establezcan y prosperen (Bystriakova *et al.*, 2011), por lo que es probable que los efectos del cambio climático, tengan una fuerte repercusión en la viabilidad de sus poblaciones.

Las especies pueden responder de dos formas fundamentales a los efectos del cambio climático: expandiendo y/o contrayendo sus distribuciones (Feria-Arroyo *et al.*, 2011). Atendiendo al hecho de la alta fidelidad de las poblaciones de *A. firma* y *C. fulva* por el BHM, los modelos de distribución potencial de ambas especies para el año 2050, bajo dos escenarios de cambio climático, podrían estar prediciendo en realidad la extensión de pérdida de su hábitat dentro de este ecosistema, la cual se estimó entre 28% y 50% bajo el escenario conservador, y para el drástico alcanza hasta el 79%. Si bien, bajo ambos escenarios de cambio climático ocurre una reducción del hábitat potencial, es en el escenario drástico donde las poblaciones se verán mucho más afectadas en su distribución, dado que en este la temperatura aumentará entre 3 y 5°C, lo cual sin duda desplazará su hábitat hacia los sitios donde las condiciones ambientales permanezcan más estables. Algunos datos recientes, parecen corroborar la hipótesis de que ambas

especies de helechos arborescentes pueden considerarse como indicadoras de la presencia del BHM: de acuerdo con Ponce-Reyes *et al.* (2012), en México para el año 2080 probablemente se perderá el 68% de la cobertura del BHM, el cual es considerado como uno de los ecosistemas terrestres más vulnerables a los impactos del cambio climático, a corto plazo.

Rojas-Soto *et al.* (2012) predicen una reducción de entre 54 y 76% del BHM en las zonas este y sur de México para el año 2050, y mencionan que este ecosistema es particularmente susceptible al cambio climático, ya que está integrado por especies que, debido a su aislamiento geográfico, rango limitado de distribución y adaptaciones ambientales únicas, son potencialmente las más amenazadas bajo un escenario de cambio climático. Tal es el caso de los helechos arborescentes de la familia Cyatheaceae, que durante el Mesozoico medio se encontraban ampliamente distribuidos en el planeta y que han venido modificando su distribución debido a subsecuentes cambios climáticos, sobreviviendo en la actualidad de manera relictual en montañas tropicales y subtropicales (Ramírez, 2009).

Es probable que la transformación y reducción de las áreas climáticamente idóneas para los helechos arborescentes (y en otros grupos de plantas) dentro del BHM, no se refleje de manera inmediata en sus poblaciones. Sin embargo, el nivel de modificación en la composición, estructura y procesos que ocurran en este ecosistema (Ponce-Reyes *et al.*, 2012; Ramírez-Barahona *et al.*, 2011) si serán evidentes en las próximas décadas (a mediano y largo plazo) en las poblaciones de *A. firma* y *C. fulva*, por la capacidad de tolerancia a la sombra y su asociación a sitios húmedos, ambas especies dependen de que exista cierto grado de cobertura arbórea. Aparentemente las condiciones experimentadas en áreas con disturbio, no son apropiadas para su establecimiento y supervivencia a largo plazo, como lo demuestran algunos estudios recientes (Mehltreter y García Franco, 2008; Eleutério y Pérez-Salicrup, 2009; Capítulo 2 del presente estudio).

La construcción de modelos de distribución potencial resulta una herramienta útil para hacer aproximaciones al conocimiento de la biodiversidad (Elith *et al.*, 2006, 2011; Baldwin, 2009; Kumar y Stohlgren, 2009; Contreras-Medina *et al.*, 2010). En el presente estudio el programa MaxEnt demostró ser una herramienta muy útil, en el sentido de que los modelos de distribución obtenidos se lograron interpretar con parsimonia y adecuadamente, con base en el conocimiento de las características biológicas conocidas en ambas especies de helechos (v. gr. registros de colectas, preferencias ecológicas), pese a que se ha señalado que los modelos pueden estar siendo afectados por diferentes fuentes de incertidumbre, dado que están basados solamente en factores ambientales, y no consideran otros factores externos, tales como limitaciones históricas, interacciones entre especies, barreras geográficas y cambios en los patrones de uso de suelo (Pearson *et al.*, 2006; Ballesteros-Barrera *et al.*, 2007). De cualquier forma, el ejercicio complementario es, corroborar la presencia de ambas especies dentro del área potencial estimada por los modelos, situación que se vuelve apremiante si se considera que las dos especies se encuentran sujetas a protección especial en la legislación mexicana (NOM-O59-SEMARNAT-2010) y que la comercialización de especies de *Cyathea* se halla regulada por la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES, 2008).

LITERATURA CITADA

- Arens N.C. 2001. Variation in performance of the tree fern *Cyathea caracasana* (Cyatheaceae) across a successional mosaic in an andean cloud forest. *American Journal of Botany* **88**: 545–551.
- Baldwin R.A. 2009. Use of Maximum Entropy Modeling in wildlife research. *Entropy* **11**: 854–866.
- Ballesteros-Barrera C., Martínez-Meyer E. y Gadsen H. 2007. Effects of land-cover transformation and climate change on the distribution of two microendemic lizards, Genus *Uma*, of Northern Mexico. *Journal of Herpetology* **41**: 733-740.
- Bickford A.S. y Laffan S.W. 2006. Multi-extent analysis of the relationship between pteridophyte species richness and climate. *Global Ecology and Biogeography* **15**:588-601.
- Bystriakova N., Schneider H. y Coomes D. 2011. Evolution of the climatic niche in scaly tree ferns (Cyatheaceae, Polypodiopsida). *Botanical Journal of the Linnean Society* **165**: 1-19.
- Challenger A. 1998. Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México: Pasado, presente y futuro. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Biología, México, 847 pp.
- CITES. 2008. Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora. www.cites.org. Revisada Marzo 2011.
- CONABIO. 2010. El bosque mesófilo de montaña en México: Amenazas y oportunidades para su conservación y manejo sostenible. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, D.F. 197 pp.

- Contreras-Medina R., Luna-Vega I. y Ríos-Muñoz C. 2010. Distribución de *Taxus globosa* (Taxaceae) en México: Modelos ecológicos de nicho, efectos del cambio del uso de suelo y conservación. *Revista Chilena de Historia Natural* **83**: 421-433.
- Cuevas Hernández A. L., Sánchez-González A. y Tejero-Díez J.D. 2013. Pteridophytes of a Semiarid Natural Protected Area in Central Mexico. *Natural Areas Journal* **33**: 177-188.
- Elith J., Graham C.H., Anderson R.P., Dudík M., Ferrier S., Guisan A., Hijmans R.J., Huettmann F., Leathwick J.R., Lehmann A., Li J., Lohmann L.G., Loiselle B.A., Manion G., Moritz C., Nakamura M., Nakazawa Y., Overton J.M., Peterson A.T., Phillips S.J., Richardson K., Scachetti-Pereira R., Schapire R.E., Soberón J., Williams S., Wisz M.S. y Zimmermann N.E., 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography* **29**:129-151.
- Elith J., Phillips S.J., Hastie T., Dudík M. Chee Y.E. y Yates C.J. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions* **17**:43-57.
- Eleutério A.A. y Pérez-Salicrup D. 2009. Transplanting tree ferns to promote their conservation in Mexico. *American Fern Journal* **99**: 279-291.
- ESRI. 2002. ArcView 3.3. ESRI (Environmental Scientific Research Institute). Redlands, California, USA.
- Feria-Arroyo T. P., Trujano O. M., Martínez L.M.A., Llorente B.J., Dale J.M. y Muñoz J. 2011. Efecto del cambio climático en la distribución de los lepidópteros mesoamericanos *Itaballia demophile centralis* Joicey & Talbot, 1928 y *Pieriballia viardi viardi* (Boisduval, 1836). En: Sánchez-Rojas G., Ballesteros B.C. y Pavón N.P. Eds. *Cambio Climático: aproximaciones para el estudio de su efecto sobre la biodiversidad*, pp. 101-120, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México.

- Ferrer-Castán D. y Vetaas R.E. 2005. Pteridophyte richness, climate and topography in the Iberian Peninsula: comparing spatial and nonspatial models of richness patterns. *Global Ecology and Biogeography* **14**:155-165.
- González-Espinosa M., Meave J.A., Ramírez-Marcial N., Toledo-Aceves T., Lorea-Hernández F.G. y Ibarra-Manríquez G. 2012. Los bosques de niebla de México: conservación y restauración de su componente arbóreo. *Ecosistemas* **21**: 36-52.
- Gutiérrez-Garduño M. V. 1999. Sistematización del Herbario Nacional Forestal Biól. Luciano Vela Gálvez. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Bases de datos SNIB-CONABIO proyecto No. P140. México, D.F.
- Hijmans R. J., Guarino L. y Mathur P. 2012. Diva Gis (Versión 7.5) Free mapping Program. Disponible en <http://www.diva-gis.org>. Hydro1k. Disponible en: http://eros.usgs.gov/#/Find_Data/Products_and_Data_Available/gtopo30.
- IPCC (2007) Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación). IPCC. Suiza http://www.ipcc-data.org/sres/gcm_data.html
- Jayat P., Pacheco S. y Ortiz E.P. 2009 A predictive distribution model for *Andinomys edax* (Rodentia: Cricetidae) in Argentina. *Mastozoología Neotropical* **16**: 321-332.
- Jiménez-Valverde A. y Lobo J.M. 2007. Threshold criteria for conversion of probability of species presence to either-or presence-absence. *Acta Oecologica* **31**: 361-369.
- Karst J., Gilbert B. y Lechowicz J.M. 2005. Fern community assembly: the roles of chance and the environment at local and intermediate scales. *Ecology* **86**: 2473-2486.

- Kluge J., Kessler M. y Dunn R.R. What drives elevational patterns of diversity? A test of geometric constraints, climate and species pool effects for pteridophytes on an elevational gradient in Costa Rica. *Global Ecology and Biogeography* **15**: 358-371.
- Korall P., Conant S.D., Metzgar S.J., Schneider H. y Pryer M.K. 2007. Molecular phylogeny of scaly tree ferns (Cyatheaceae). *American Journal of Botany* **94**: 873-886.
- Kumar S. y Stohlgren T.J. 2009. Modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia. *Journal of Ecology and Natural Environment* **1**: 094-098.
- Large M.F. y Braggins J.E. 2004. Tree ferns. Timber Press, Portland, EUA.
- Liu C., Berry P.M., Dawson T.P. y Pearson R.G. 2005. Selecting thresholds of occurrence in the prediction of species distributions. *Ecography* **28**:385-393.
- López-Mata L., Villaseñor J.L., Cruz-Cárdenas G., Ortiz E. y Ortiz-Solorio C. 2012. Predictores ambientales de la riqueza de especies de plantas del bosque húmedo de montaña de México. *Botanical Sciences* **90**: 1-10.
- Lorea-Hernández F., Avendaño-Reyes S. y Sosa-Ortega V. 2000. Actualización de las bases de datos del Herbario del Instituto de Ecología, AC (XAL). Instituto de Ecología A.C. Bases de datos SNIB-CONABIO proyectos No. K004, E008 y P026. México, D.F.
- Luna-Vega M.I. 1997. Florística y biogeografía de algunos bosques mesófilos de la Huasteca Hidalguense: Fase I (Tenango de Doria y Tlanchinol). Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ciencias. Bases de datos SNIB-CONABIO. Proyecto No. B133. México, D.F.
- Luna-Vega M.I. 1999. Florística y biogeografía de algunos bosques mesófilos de la Huasteca Hidalguense: Fase II (Tlahuelompa y Eloxochitlán). Universidad Nacional Autónoma de

- México. Facultad de Ciencias. Bases de datos SNIB2010-CONABIO. Proyecto No. H102. México, D.F.
- Luna-Vega M.I. 2000. Florística y biogeografía de algunos bosques mesófilos de la Huasteca Hidalguense: Fase 3 (Chapulhuacán y Pisaflores). Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ciencias. Bases de datos SNIB2010-CONABIO. Proyecto No. L091. México, D.F.
- Luna-Vega I., Alcántara O., Morrone J.J. y Espinosa-Organista D. 2000. Track analysis and conservation priorities in the cloud forests of Hidalgo, Mexico. *Diversity and Distributions* **6**: 137-143.
- Luna-Vega I., Morrone J.J., Alcántara Ayala O. y Espinosa-Organista D. 2001. Biogeographical affinities among Neotropical cloud forests. *Plant Systematics and Evolution* **228**: 229-239.
- Mehlreter K. y García-Franco G.J. 2008. Leaf phenology and trunk growth of the deciduous tree fern *Alsophila firma* (Baker) D. S. Conant in a lower montane mexican forest. *American Fern Journal* **98**: 1-13.
- Mickel J.T. y Smith A.R. 2004. The Pteridophytes of Mexico. New York Botanical Garden. New York.
- Page C.N. 2002. Ecological strategies in fern evolution: a neopteridological overview. *Review of Paleobotany and Palynology* **119**:1-33.
- Panero J.L. y CONABIO. 2003. Catálogo electrónico de especímenes depositados en el Herbario de la Universidad de Texas en Austin, Fase IV. The University of Texas. Bases de datos. Ejemplares Mexicanos. SNIB2010-CONABIO proyectos No. AE013, V057, V007 y Q047. México, D.F.

- Pearson R.G., Thuiller W., Araujo M.B., Brotons L., Martínez-Meyer E., McClean C., Miles L., Segurado P., Dawson T.P. y Lees D. 2006. Model-based uncertainty in species' range prediction. *Journal of Biogeography* **33**: 1704-1711.
- Pearson R.G., Raxworthy J.C., Nakamura M. y Peterson T.A. 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 T.A. 2006. Uses and requirements of ecological niche models and related distributional models. *Biodiversity Informatics* **3**: 59-72.
- Phillips J.S., Anderson R.P. y Schapired E. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* **190**: 231-259.
- Ponce-Reyes R., Reynoso-Rosales V.H., Watson M.J.E., VanDerWal J., Fuller A.R., Pressey L.R. y Possingham P.H. 2012. Vulnerability of cloud forest reserves in Mexico to climate change. *Nature Climate Change* 1-5.
- Ramírez B.S.A. 2009. Variación genética y filogeografía de helechos arborescentes (Cyatheaceae) del bosque mesófilo de montaña de la Sierra Madre Oriental. Tesis Licenciatura en Biología. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Ramírez-Barahona S.A., Luna-Vega I. y Tejero-Díez D. 2011. Species richness, endemism, and conservation of American tree ferns (Cyatheales). *Biodiversity and Conservation* **20**: 59-72.
- Rangel T.F., Diniz-Filho J.A.F. y Bini L.M. 2010. SAM: A comprehensive application for Spatial Analysis in Macroecology. *Ecography* **33**: 1-5.

- Rojas-Soto O.R., Sosa V. y Ornelas J.F. 2012. Forecasting cloud forest in eastern and southern Mexico: conservation insights under future climate change scenarios. *Biodiversity and Conservation* **21**: 2671-2690.
- Rzedowski J. 1978. Vegetación de México. Limusa. México, Distrito Federal.
- Rzedowski J. y Zamudio S. 2001. Etapa final de la captura y catalogación del Herbario del Instituto de Ecología, AC, Centro Regional del Bajío. Bases de datos SNIB-CONABIO proyectos No. Q017, J097 y F014. México, D. F.
- Sanginés-Franco C., Luna-Vega I., Alcántara-Ayala O. y Contreras-Medina R. 2011. Distributional patterns and biogeographic analysis of ferns in the Sierra Madre Oriental, Mexico. *American Fern Journal* **101**: 81-104.
- SEMARNAT. 2010. Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. Diario Oficial de la Federación, México.
- Siles G., Bastida J., Rey J.P. y Alcántara J. 2004. Modelos predictivos de distribución de especies de vegetación potencial en el incendio del puerto de “Las Palomas”, Sierra de Cazorla, Jaén. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales* **20**: 167-172.
- Soria-Auza W.R., Kessler M., Bach K., Barajas-Barbosa M.P., Lehnert M., Herzog K.S. y Böhner J. 2010. Impact of the quality of climate models for modelling species occurrences in countries with poor climatic documentation: a case study from Bolivia. *Ecological Modelling* **221**: 1221-1229.
- Smith S.A. y Donoghue M.J. 2010. Combining historical biogeography with niche modeling in the Caprifolium clade of *Lonicera* (Caprifoliaceae, Dipsacales). *Systematic Biology* **59**:322-41.

- Smith R.A., Pryer M.K., Schuettpelz E., Korall P., Schneider H. y Wolf G.P. 2008. Fern classification. En: Ranker T.A. y Haufler C.H. Eds. *Biology and evolution of Ferns and Lycophytes*, pp. 417-462, Cambridge University Press, New York, USA.
- Téllez-Valdés O., Dávila-Aranda P. y Lira-Saade R. 2006. The effects of climate change on the long-term conservation of *Fagus grandifolia* var. *mexicana*, an important species of the cloud forest in eastern Mexico. *Biodiversity and Conservation* **15**:1095–1107.
- Toledo V.M. y Ordóñez M.J. 2009. Zonas ecológicas de México. Diagnóstico de los escenarios de la biodiversidad en México. Escala 1:1 000 000. Centro de Ecología, UNAM. CONABIO.
- Torres R. y Jayat J.P. 2010. Modelos predictivos de distribución para cuatro especies de mamíferos (Cingulata, Artiodactyla y Rodentia) típicas de Chaco en Argentina. Mendoza. *Mastozoología Neotropical* **17**: 335-352.
- Urrego H.D., Silman R.M. y Bush B.M. 2005. The Last Glacial Maximum: stability and change in a western Amazonian cloud forest. *Journal of Quaternary Science* **20**: 693-701.
- Villaseñor, J.L. 2010. El bosque húmedo de montaña en México y sus plantas vasculares: catálogo florístico-taxonómico. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad - Universidad Nacional Autónoma de México. 40 pp. México, D.F.
- WorldClim. Disponible en: <http://www.worldclim.org/bioclim>; consulta 15 de febrero de 2012.

ANEXOS

ANEXO I. Variables climáticas y topográficas utilizadas para el modelado de la distribución de las especies de Cyatheaceae en MaxEnt.

Abreviatura	Variables bioclimáticas
Bio 1	Temperatura media anual
Bio 2	Rango promedio de temperaturas diarias (Tmax - Tmin)
Bio 3	Isotermalidad (BIO2/BIO7)x100
Bio 4	Estacionalidad de la temperatura (Desv. Estan. x 100)
Bio 5	Temperatura máxima del mes más cálido
Bio 6	Temperatura mínima del mes más frío
Bio 7	Rango anual de la temperatura (BIO5-BIO6)
Bio 8	Temperatura media del trimestre más húmedo
Bio 9	Temperatura media del trimestre más seco
Bio 10	Temperatura media del trimestre más cálido
Bio 11	Temperatura media del trimestre más frío
Bio 12	Precipitación anual
Bio 13	Precipitación del mes más húmedo
Bio 14	Precipitación del mes más seco
Bio 15	Estacionalidad de la precipitación
Bio 16	Precipitación del trimestre más húmedo
Bio 17	Precipitación del trimestre más seco
Bio 18	Precipitación del trimestre más cálido
Bio 19	Precipitación del trimestre más frío
Abreviatura	Variables Topográficas
slope	Pendiente
topoind	Índice topográfico
aspect	Orientación
dem	Modelo Digital de Elevación

CAPÍTULO IV

Discusión general y conclusiones

Uno de los grandes problemas a los que México se enfrenta actualmente es la acelerada destrucción de las comunidades vegetales, donde uno de los casos más alarmantes es el del BHM. Esta comunidad presenta una alta diversidad biológica, especialmente una gran riqueza de helechos, siendo particularmente representativas las especies de helechos arborescentes de los géneros *Alsophila*, *Cyathea* y *Dicksonia* (Cayuela *et al.*, 2006).

Los helechos arborescentes son componentes conspicuos del subdosel de los bosques húmedos de montaña en las regiones tropicales del mundo, algunas veces contribuyen estructuralmente de manera importante en la cobertura total del bosque y, son reconocidos como especies clave debido a que sus coronas de hojas actúan como filtros en el proceso de regeneración de los árboles (Bystriakova *et al.*, 2011b).

En México, algunas especies de helechos arborescentes de Cyatheaceae son usadas como ornamentales y para la obtención del “maquique” (Eleutério y Pérez-Salicrup, 2009), lo cual aunado al deterioro acelerado de su hábitat, ha provocado que se encuentren actualmente en alguna categoría de riesgo dentro de la norma oficial mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010 (SEMARNAT, 2010) y, el género *Cyathea* se incluya dentro del Apéndice II de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES, 2010).

De acuerdo con las normas de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, la inclusión, exclusión o cambio de categoría de riesgo debe hacerse con base en el Método de Evaluación de Riesgo de Extinción de las Especies Silvestres en México (MER). Las mismas normas sugieren, que es necesario actualizar periódicamente la información acerca de las poblaciones. No obstante, si las estimaciones del riesgo de extinción no se traducen en acciones que efectivamente permitan la conservación de los taxones, se pierde el objetivo del ejercicio (SEMARNAT, 2010; Whitten *et al.*, 2001).

Debido a las características de las plantas, especialmente en cuanto a la distribución geográfica, especificidad del hábitat y las características demográficas, en la versión más reciente de la NOM-059-SEMARNAT-2010 se presenta el Método de Evaluación del Riesgo de Extinción de Plantas en México “MER-Plantas”, que evalúa el riesgo de extinción de este grupo biológico en particular (SEMARNAT, 2010). Dicho método utiliza cuatro criterios los cuales son independientes uno del otro y la suma final de éstos, determina la categoría de riesgo dentro de la cual se ubica el taxón en estudio (Anexo 1).

Tres de los cuatro criterios del método toman en cuenta la biología e historia natural del taxón (distribución, características del hábitat y características biológicas que pueden aumentar su fragilidad ante eventos de disturbio), mientras que el cuarto criterio considera su interacción con el hombre, es decir, el impacto de las actividades antropogénicas sobre sus poblaciones (Tambutti *et al.*, 2001). Estos criterios se mencionan a continuación y se contrastan con respecto a los resultados obtenidos en el presente estudio:

Criterio A) Características de la distribución geográfica. Es el tamaño relativo del área de distribución del taxón respecto al área total del territorio nacional (en el presente estudio se evaluó sólo a nivel estatal). Considera características como la extensión de la distribución de la especie, las poblaciones o localidades conocidas existentes, las provincias biogeográficas en que se encuentra y la representatividad de la distribución del taxón en México.

En la presente investigación este criterio se abordó mediante dos opciones o métodos alternativos: (1) calculando la extensión del área ocupada (“EOO, extent of occurrence”; IUCN, 2001) que corresponde al área contenida dentro de los límites imaginarios continuos más cortos que pueden dibujarse para incluir todos los sitios conocidos, inferidos o proyectados, en los que un taxón se encuentre presente, esto se llevó a cabo utilizando ArcView 3.3 (IUCN, 2001; Feria-Arroyo *et al.*, 2009; Feria-Arroyo *et al.*, 2010; Mehltreter, 2010); y (2) calculando el área

potencial de distribución (área probable de distribución que representa las condiciones del hábitat conocido para la especie) a partir de modelos de distribución potencial utilizando MaxEnt. La extensión del área ocupada que se calculó para ambas especies con la primera opción, resultó ser mucho menor (35 Km² en el caso de *A. firma* y 44 Km² en el de *C. fulva*) que la obtenida con la opción 2, a partir de la distribución potencial (902.05 Km² para *A. firma* y 571.48 Km² para *C. fulva*). En el primer caso, se utilizan sólo los puntos en los cuales se ha registrado la presencia de las especies; y en el segundo, se incluyen todas las localidades donde existen coordenadas geográficas de referencia. Sin embargo, es recomendable visitar aquellas zonas donde el modelo de distribución potencial predice su presencia, con lo que seguramente se incrementaría la extensión del área que ocupan dentro del estado y se tendría la certeza de si se trata sólo de individuos aislados o de poblaciones bien establecidas (Kumar y Stohlgren, 2009; Torres y Jayat, 2010).

Criterio B) Características del hábitat. Se refiere a la condición actual del hábitat como un estimado del conjunto de requerimientos, tanto bióticos como abióticos, conocidos para el desarrollo natural del taxón. Este criterio evalúa aspectos relacionados con los tipos de vegetación que ocupan las especies, la especialización del hábitat, si existe dependencia hacia algún hábitat primario, o si el taxón de interés requiere regímenes de perturbación, así como el intervalo altitudinal que abarca.

En México las poblaciones de las distintas especies de Cyatheaceae se desarrollan en sitios montañosos, aunque pueden hallarse en encinares y bosques de pino-encino, es en los manchones del BHM donde tienen una distribución continua, preferentemente en ambientes riparios (Mickel y Smith, 2004). De acuerdo con los resultados obtenidos, las poblaciones de *A. firma* y *C. fulva* son tolerantes a la sombra, y ambas especies dependen de que exista una elevada cobertura arbórea, pues aparentemente las condiciones experimentadas en áreas con disturbio, no son

apropiadas para su establecimiento y supervivencia a largo plazo, como lo demuestran algunos trabajos recientes (Mehltreter y García Franco, 2008; Eleutério y Pérez-Salicrup, 2009; Capítulo 2 del presente estudio).

En cuanto al grado de especialización a un hábitat particular, los resultados del presente estudio corroboran que existe una alta fidelidad de los helechos arborescentes con respecto al BHM. Las condiciones de elevada humedad ambiental, temperatura moderada y escasa temporalidad que caracterizan a este tipo de vegetación, proveen la mejor oportunidad para que *A. firma* y *C. fulva* se establezcan y prosperen; como ocurre con para la mayoría de las especies de Cyatheaceae a escala global (Bystriakova *et al.*, 2011).

Criterio C) Vulnerabilidad biológica intrínseca. Considera los atributos relacionados con la historia o forma de vida de una especie que la hacen vulnerable (demografía, fenología, grado de especialización a un hábitat en particular, entre otros). La NOM-059 evalúa tres aspectos dentro de este criterio: demografía (v. gr. número de individuos, reclutamiento, atributos demográficos), genética e interacciones bióticas especializadas (v. gr. nodriza, hospedero, mirmecofilia, polinizador, dispersor, micorriza, depredación o patógenos).

Dentro de los aspectos demográficos analizados, en las dos especies de helechos arborescentes se encontraron poblaciones normales y dinámicas (tres dinámicas y una normal en *A. firma*; dos dinámicas y dos normales en *C. fulva*). De acuerdo con varios autores, la ocurrencia de poblaciones dinámicas (con predominio de individuos jóvenes o de tamaño pequeño) en varias especies de helechos arborescentes, es un indicador de que tienen un alto potencial de regeneración y expansión (Schmitt y Windisch, 2006; Nagano y Suzuki, 2007; Schmitt y Windisch, 2007) y de que las condiciones micro-ambientales son favorables para el establecimiento y desarrollo, tanto de los gametofitos como de los esporofitos (Bernabe *et al.*, 1999; Mehltreter y García-Franco, 2008).

Sin embargo, aquellas poblaciones con predominio de individuos jóvenes, también pueden ser producto de la acción de factores externos, como por ejemplo de la extracción ilegal de individuos adultos para comercializarlos o para obtener el “maquique”, lo que redundaría en la modificación de la estructura de edades de la población, por la disminución del número de individuos maduros y viejos (Eleutério y Pérez-Salicrup, 2009). En la zona de estudio no se encontraron evidencias de extracción de individuos maduros o viejos, salvo por la presencia de los restos de dos individuos adultos que fueron cortados y derribados en dos sitios aledaños a las parcelas de muestreo; por lo que es improbable que esta sea la causa principal de la baja densidad de individuos maduros y viejos en las parcelas de muestreo.

Criterio D) Impacto de la actividad humana. Es una estimación numérica de la magnitud del impacto y las tendencias que generan las distintas actividades humanas sobre el taxón (fragmentación del hábitat, contaminación, uso, comercio o proximidad de asentamientos humanos). De acuerdo con el MER-Plantas, el impacto de la actividad humana se conocerá evaluando aspectos tales como: el efecto de la alteración antrópica del hábitat, el nivel de impacto de actividades humanas, si existe evidencia de deterioro en la calidad/extensión del hábitat como efecto del cambio climático, si se prevé un cambio drástico en el uso del suelo, el impacto de uso sobre el taxón y si se cultiva o propaga *ex situ*.

Las poblaciones de las dos especies de helechos arborescentes analizadas, se desarrollan mejor en condiciones de sombra que en sitios abiertos. A pesar de que se les llega a encontrar creciendo en los claros de bosque o persistiendo en etapas tardías de la sucesión, en la mayoría de los casos se trata sólo de individuos aislados, que pudieron haber encontrado un microambiente ideal para establecerse, pero que no llegan a formar una población como tal (Bernabe *et al.*, 1999; Eleutério y Pérez-Salicrup, 2009; Bystriakova *et al.*, 2011).

De acuerdo con los modelos de distribución potencial bajo dos escenarios de cambio climático en el año 2050, la pérdida del hábitat de estas especies sería de entre 28% y 50% bajo el escenario conservador, y para el drástico alcanzaría hasta el 79%. Rojas-Soto *et al.* (2012) predicen una reducción de entre 54 y 76% de la cobertura del BHM para el año 2050, en las zonas este y sur de México y particularmente para la Sierra Madre Oriental; asimismo reconocen a dicho ecosistema como susceptible al cambio climático, ya que está integrado por especies que debido a su aislamiento geográfico, intervalo de distribución estrecho y adaptaciones ambientales únicas (*A. firma* y *C. fulva* son un buen ejemplo de ello), son potencialmente las más amenazadas bajo un escenario de cambio climático (González-Espinosa *et al.*, 2011; Ponce-Reyes *et al.*, 2012).

El MER-Plantas es una herramienta útil para evaluar el riesgo de extinción de las especies en México, siempre y cuando se trate de taxones o grupos bien conocidos, o bien, que se cuente con información específica relacionada con los rubros que el método considera en la evaluación. Un ejemplo de ello son los aspectos genéticos y demográficos, para los cuales se requiere tener conocimiento de la manera cómo varían dentro y entre las poblaciones de una misma especie a lo largo del territorio mexicano (Tambutti *et al.*, 2001). De cualquier forma, el MER-Plantas representa un avance sustancial en el sentido de que consta de una serie de preguntas que están directamente relacionadas con este grupo biológico en particular, a diferencia del MER anterior (SEMARNAT, 2002), que usaba los mismos criterios independientemente del grupo que se tratara.

La crítica más importante con respecto al MER plantas, que emana de los resultados de este trabajo es que se le puede considerar un método cualitativo, en el que las respuestas en varios de los criterios se basan en apreciaciones o en la experiencia de las personas. En contraste, existen métodos o técnicas, derivadas de distintas áreas del conocimiento (ecología, sistemática,

biogeografía, genética, etnobiología, entre otras), que proporcionan información más detallada, fidedigna y objetiva al evaluar de manera cualitativa y cuantitativa, el estado actual y futuro de los taxones.

Un buen ejemplo de las técnicas estadísticas que han probado ser de gran utilidad en la evaluación del estatus de las poblaciones en diferentes especies de organismos (Feria-Arroyo *et al.*, 2009; Contreras-Medina *et al.*, 2010), incluidas las dos especies de helechos arborescentes del presente estudio, son los sistemas de información geográfica. Estas herramientas están diseñadas para proporcionar información sencilla, confiable (porque es susceptible de verificación) y rápida, acerca de la distribución potencial actual y en el futuro de las especies, lo cual resulta crucial para definir la categoría de riesgo de los taxones y con base en ello la urgencia o no de establecer programas de manejo y conservación (Feria-Arroyo *et al.*, 2009; Mehlreter, 2010).

Finalmente, cuando se evaluó el riesgo de extinción de ambas especies siguiendo únicamente el cuestionario incluido en el MER-Plantas, tanto *A. firma* como *C. fulva* se mantuvieron en la misma categoría de riesgo en la que se encontraban (sujetas a protección especial). Sin embargo, los resultados del presente estudio indican que la distribución de las poblaciones de ambas especies de helechos arborescentes se reducirá drásticamente en unas cuantas décadas (año 2050), por lo que una de las estrategias a seguir es incluirlos en una categoría de riesgo más crítica de en la que actualmente se encuentran, para que se establezcan medidas más drásticas e inmediatas de protección, es decir, que se consideren como especies Amenazadas (SEMARNAT, 2010), puesto que podrían llegar a encontrarse en peligro de desaparecer a corto o mediano plazo, si siguen operando los factores que inciden negativamente en su viabilidad o disminuye el tamaño de sus poblaciones, particularmente aquellos que propician el deterioro y modificación de su hábitat.

Por el elevado grado de fidelidad que guardan con las condiciones climáticas particulares de su hábitat (el BHM), principalmente con la temperatura y humedad, así como con la compleja topografía que lo caracteriza; el manejo y conservación adecuado de ambas especies de helechos arborescentes implica la preservación del BHM y por ende, de una gran cantidad de especies de plantas que coexisten dentro de este tipo de vegetación, y que se considera están en inminente riesgo de desaparición, tales como *Carpinus caroliniana*, *Dicksonia sellowiana*, *Fagus grandifolia* subsp. *mexicana*, *Magnolia schiedeana*, *Marattia weinmanniifolia*, *Podocarpus matudae* y *Psilotum nudum*, por mencionar algunas (SEMARNAT, 2010; González-Espinosa *et al.*, 2011; Rodríguez-Ramírez *et al.*, 2013).

CONCLUSIONES

- En las dos especies de helechos arborescentes analizadas se encontraron poblaciones normales y dinámicas (tres dinámicas y una normal en *A. firma*; dos dinámicas y dos normales en *C. fulva*), lo cual puede ser un indicador de que tienen un alto potencial de regeneración y de que se desarrollan bajo condiciones micro-ambientales favorables para el establecimiento tanto de los gametofitos como de los esporofitos. Aunque también puede ser producto de la acción de factores externos como la extracción ilegal de individuos adultos para su comercialización.
- Todas las poblaciones de ambas especies formaban parte del sub-dosel, en sitios donde la cobertura arbórea fue mayor de 89%, por lo que se consideran tolerantes a la sombra. La pendiente del terreno y la cobertura del suelo, fueron las variables que mejor explicaron las diferencias en los valores de densidad poblacional en *A. firma*; mientras que con respecto a *C. fulva*, la cobertura del dosel fue la única variable relacionada con la densidad poblacional. Los resultados obtenidos en el presente estudio indican que el establecimiento y supervivencia a largo plazo de las poblaciones de ambas especies de helechos arborescentes, depende en gran medida de la conservación del BHM, debido a que, por su capacidad de tolerancia a la sombra, requieren de la existencia de cierto grado de cobertura vegetal.
- El modelo de distribución potencial actual para *A. firma* la ubica en tres zonas ecológicas dentro del estado de Hidalgo: templada sub-húmeda, templada húmeda y tropical húmeda, con una distribución más amplia hacia la zona tropical húmeda y ocupando un área de 902.05 km²; mientras que *C. fulva* tiene una distribución restringida, a manera de pequeños parches en las mismas zonas ecológicas, pero ocupando un área menor (571.48 km²).

- Las variables que resultaron más importantes para explicar el modelo de distribución en ambas especies de helechos arborescentes están directamente relacionadas con la disponibilidad de agua: la precipitación anual (BIO 12) resultó ser la más significativa para *A. firma* y la precipitación del trimestre más seco (BIO 17), lo fue para *C. fulva*, lo cual es consistente con los requerimientos del gametofito para completar la fertilización, que depende en gran medida de la disponibilidad de agua en el ambiente.
- Atendiendo al hecho de la alta fidelidad de las poblaciones de *A. firma* y *C. fulva* por el BHM, los modelos de distribución potencial de ambas especies para el año 2050, bajo dos escenarios de cambio climático, podrían estar prediciendo en realidad la extensión de pérdida de su hábitat dentro de este ecosistema, la cual se estimó entre 28% y 50% bajo el escenario conservador, y para el drástico alcanza hasta el 79%.

LITERATURA CITADA

- Bernabe N., Williams-Linera G. y Palacios-Ríos M. 1999. Tree ferns in the interior and at the edge of a Mexican cloud forest remnant: Spore germination and sporophyte survival and establishment. *Biotropica* **31**: 83-88.
- Bystriakova N., Schneider H. y Coomes D. 2011a. Evolution of the climatic niche in scaly tree ferns (Cyatheaceae, Polypodiopsida). *Botanical Journal of the Linnean Society* **165**: 1-19.
- Bystriakova N., Bader M. y Coomes D.A. 2011b. Long-term tree fern dynamics linked to disturbance and shade tolerance. *Journal of Vegetation Science* **22**: 72-84.
- Cayueta L., Golicher D.J. y Rey-Benayas J.M. 2006. The extent, distribution, and fragmentation of vanishing montane cloud forest in the Highlands of Chiapas, Mexico. *Biotropica* **38**: 544-554
- CITES. 2010. Apéndices I, II y III. <http://www.cites.org/eng/app/appendices.shtml>. Consultada: Octubre 2010
- Contreras-Medina R., Luna-Vega I. y Ríos-Muñoz C. 2010. Distribución de *Taxus globosa* (Taxaceae) en México: Modelos ecológicos de nicho, efectos del cambio del uso de suelo y conservación. *Revista Chilena de Historia Natural* **83**: 421-433.
- Eleutério A.A. y Pérez-Salicrup D. 2009. Transplanting tree ferns to promote their conservation in Mexico. *American Fern Journal* **99**: 279-291.
- Feria-Arroyo T.P., Olson M.E., García-Mendoza A. y Solano E. 2009. A GIS-based comparison of the Mexican National and IUCN methods for determining extinction risk. *Conservation Biology* **23**: 1156-1166.
- Feria-Arroyo T.P., Solano E. y García-Mendoza A. 2010. Reevaluación del riesgo de extinción de cinco especies del Género *Polianthes* L. (Agavaceae). *Acta Botánica Mexicana* **92**: 11-28

- González-Espinosa M., Meave J.A., Lorea-Hernández F.G., Ibarra-Manríquez G. y Newton, A.C. Eds. 2011. The red list of Mexican Cloud Forest trees. Fauna & Flora International, Cambridge. Disponible en línea: <http://globaltrees.org/rl_mexican_cloudforest.html>
- IUCN. 2001. IUCN Red List Categories and Criteria: Versión 3.1. Gland, Switzerland and Cambridge, UK: IUCN Species Survival Commission.
- IUCN. 2008 IUCN Red List of Threatened Species. www.iucnredlist.org. Revisada en Marzo 2011.
- Kumar S. y Stohlgren T.J. 2009. Modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia. *Journal of Ecology and Natural Environment* **1**: 094-098.
- Mehltreter K. y García-Franco J.G. 2008. Leaf phenology and trunk growth of the deciduous tree fern *Alsophila firma* (Baker) D. S. Conant in a lower montane mexican forest. *American Fern Journal* **98**:1–13.
- Mehltreter K. 2010. Fern Conservation. En: Mehltreter K., Walker R.L. y Sharpe M.J. Eds. *Fern Ecology*, pp. 323-359, Cambridge University Press. USA.
- Mickel J.T. y Smith A.R. 2004. The Pteridophytes of Mexico. New York Botanical Garden. New York.
- Nagano T. y Suzuki E. 2007. Leaf demography and growth pattern of the tree fern *Cyathea spinulosa* in Yakushima Island. *Tropics* **16** : 47-57.
- Ponce-Reyes R., Reynoso-Rosales V.H., Watson M.J.E., VanDerWal J., Fuller A.R., Pressey L.R. y Possingham P.H. 2012. Vulnerability of cloud forest reserves in Mexico to climate change. *Nature Climate Change* 1-5.

- Rodríguez-Ramírez E.Ch., Sánchez-González A. y Ángeles-Pérez G. 2013. Current distribution and extension of Mexican beech forests (*Fagus grandifolia* subsp. *mexicana*) in Mexico. *Endangered Species Research* **20**:xx-xx.
- Rojas-Soto O.R., Sosa V. y Ornelas J.F. 2012. Forecasting cloud forest in eastern and southern Mexico: conservation insights under future climate change scenarios. *Biodiversity and Conservation* **21**: 2671-2690.
- SEMARNAT. 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-059-ECOL-2001. Diario Oficial de la Federación, México.
- SEMARNAT. 2010. Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. Diario Oficial de la Federación, México.
- Schmitt J.L. y Windisch P.G. 2006. Growth rates and age estimates of *Alsophila setosa* Kaulf. in Southern Brazil. *American Fern Journal* **96**: 103-111.
- Schmitt J.L. y Windisch P.G. 2007. Estrutura populacional e desenvolvimento da fase esporofítica de *Cyathea delgadii* Sternb. (Cyatheaceae, Monilophyta) no sul do Brasil. *Acta Botanica Brasilica* **21**: 731-740.
- Tambutti M., Aldama A., Sánchez O., Medellín R. y Soberón J. 2001. La determinación del riesgo de extinción de especies en México. *Gaceta Ecológica* **61**: 11-21.
- Torres R. y Jayat J. P. 2010. Modelos predictivos de distribución para cuatro especies de mamíferos (Cingulata, Artiodactyla y Rodentia) típicas de Chaco en Argentina. Mendoza. *Mastozoología Neotropical* **17**: 335-352.
- Wihtten T., Holmes D. y MacKinnon K. 2001. Conservation biology: a displacement behavior for academia? *Conservation Biology* **15**: 1-3.

ANEXOS

ANEXO I. Comparación de los puntajes obtenidos en cada criterio del MER-Plantas para las especies en estudio

I. ÍNDICE DE RAREZA	<i>C. fulva</i>	<i>A. firma</i>
Criterio A. Características de la distribución geográfica		
1) Extensión de la distribución	2	2
2) Número de poblaciones conocidas existentes	1	1
3) Número de provincias biogeográficas en las que se encuentra	2	2
4) Representatividad de la distribución del taxón en México	0	0
<i>Subtotal del Criterio A = Suma del puntaje obtenido / 11</i>	0.45	0.45
Criterio B. Características del hábitat		
1) ¿En cuántos tipos de vegetación se presenta?	1	1
2) ¿El taxón tiene un hábitat especializado?	0	0
3) ¿La permanencia de la población es dependiente de un hábitat primario?	1	1
4) ¿La permanencia de la población requiere de regímenes de perturbación particulares o está asociada a etapas transitorias en la sucesión?	0	0
5) Amplitud del intervalo altitudinal que ocupa el taxón	0	0
<i>Subtotal del Criterio B = Suma del puntaje obtenido / 9</i>	0.22	0.22
Criterio C. Vulnerabilidad biológica intrínseca		
C-1. Demografía		
1) Número total de individuos	0	0
2) Reclutamiento	2	2
3) Atributos demográficos		
a) ¿Hay evidencia de densodependencia en la reproducción?	0	0
b) ¿Hay clonalidad?	0	0
c) ¿Hay evidencia de decrecimiento de las poblaciones en el país?	1	1
d) ¿Hay evidencia de una varianza muy grande en la fecundidad?	0	0
e) ¿El taxón es dioico, los individuos son dicógamos o autoincompatibles?	0	0
f) ¿La floración es sincrónica o gregaria?	0	0
g) ¿El taxón produce pocos propágulos?	0	0
C-2. Genética		
1) Variación molecular	0	0
2) Estructura genética molecular	0	0
3) Cantidad de variación genética	0	0
4) Nivel de diferenciación entre poblaciones	0	0
C-3. Interacciones bióticas especializadas		
1) ¿El taxón requiere una “nodriza” para su establecimiento?	0	0
2) ¿El taxón requiere un hospedero o forofito específico?	0	0
3) ¿El taxón requiere un polinizador específico?	0	0
4) ¿El taxón tiene un dispersor específico?	0	0

Evaluación del riesgo de extinción de Cyatheaceae en Hidalgo

5) ¿El taxón presenta mirmecofilia obligada?	0	0
6) ¿El taxón presenta dependencia estricta de la micorriza?	0	0
7) ¿El taxón sufre una afectación importante por depredadores o patógenos?	0	0
<i>Subtotal del Criterio C = Suma del puntaje obtenido / 23</i>	0.13	0.13
II. ÍNDICE DE IMPACTO ANTROPOGÉNICO		
Criterio D. Impacto de la actividad humana		
1) ¿Cómo afecta al taxón la alteración antrópica del hábitat?	0	0
2) ¿Cuál es el nivel de impacto de las actividades humanas sobre el hábitat del taxón?	2	2
3) ¿Existe evidencia que indique un deterioro en la calidad o extensión del hábitat como efecto de cambios globales o se prevé un cambio drástico en el uso del suelo?	1	1
4) ¿Cuál es el impacto del uso sobre el taxón?	2	2
5) ¿El taxón es cultivado o propagado ex situ?	0	0
<i>Subtotal del Criterio D = Suma del puntaje obtenido / 10</i>	0.5	0.5
<i>Puntaje obtenido</i>	1.3	1.3
<i>Categoría de riesgo</i>	Pr	Pr
Pr: Sujeta a protección especial		