



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**POSGRADO EN CIENCIAS
BIOLÓGICAS**

INSTITUTO DE BIOLOGÍA

**EFFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DISTRIBUCIÓN
ESPACIO - TEMPORAL DE DOS LAGOMORFOS EN MÉXICO.**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
(BIOLOGÍA AMBIENTAL)**

P R E S E N T A

ELIZABETH MARTÍNEZ VILLEDA

DIRECTOR DE TESIS: Dr. ENRIQUE MARTÍNEZ MEYER

MÉXICO, D.F.

OCTUBRE, 2006



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas

Tesis Digitales

Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



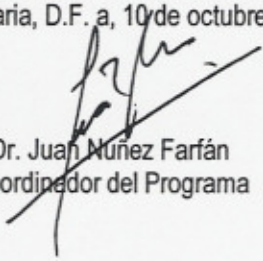
Ing. Leopoldo Silva Gutiérrez
Director General de Administración Escolar, UNAM
Presente

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la reunión ordinaria del Comité Académico del Posgrado en Ciencias Biológicas, celebrada el día 13 de marzo del 2006, se acordó poner a su consideración el siguiente jurado para el examen de grado de Maestría en Ciencias Biológicas (Biología Ambiental) de la alumna **Martínez Villeda Elizabeth** con número de cuenta **504008625** con la tesis titulada: **"Efecto del cambio climático en la distribución espacio-temporal de dos lagomorfos en México"** bajo la dirección del Dr. Enrique Martínez Meyer.

Presidente:	Dr. Víctor Sánchez-Cordero Dávila
Vocal:	Dr. Oswaldo Téllez Valdés
Secretario:	Dr. Enrique Martínez Meyer
Suplente:	Dra. Gloria Luz Portales Betancourt
Suplente:	Dr. Jorge López Blanco

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, D.F. a, 10 de octubre del 2006


Dr. Juan Nuñez Farfán
Coordinador del Programa

c.c.p. Expediente del interesado

AGRADECIMIENTOS



Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca proporcionada durante mis estudios de posgrado.

Al programa PAPIIT que mediante el proyecto IN215102 proporcionó los recursos económicos para las salidas de campo de este trabajo.

Al Dr. Enrique Martínez Meyer por la dirección de esta tesis, al Dr. Jorge López Blanco y Dr. Víctor Sánchez-Cordero Dávila (miembros del comité tutorial), Dra. Gloria Luz Portales Betancourt y Dr. Oswaldo Téllez Valdés (miembros del jurado), por sus revisiones y comentarios que ayudaron a terminar este trabajo de investigación.



A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

Y

Al Instituto de Biología por mejorar mi formación profesional mediante los estudios de su Programa de Posgrado en Ciencias Biológicas.



A todo el personal del Laboratorio de Análisis Espaciales donde se desarrolló esta tesis, y por su apoyo para la finalización de la misma.

DEDICATORIA

A MIS PADRES, HERMANOS Y AMIGOS:

Afuera de la escuela se enfrenta y aprende lo más importante en la vida,
están los retos más grandes,
las pérdidas insustituibles,
las grandes derrotas,
las victorias más placenteras,
las satisfacciones más duraderas,
las verdaderas menciones honoríficas,
los ejemplos de fortaleza,
dedicación, constancia, sabiduría y amor más sinceros.

RAÍZ (fragmento)

Soy raíz
 raíz de un tiempo que se precipita en este tiempo
 hilo de sangre que emerge desde el fondo de la selva
 y grita su destierro
 piel de once millones de cabezas e igual número de lunares
 soy raíz,
 raíz de mi ombligo,
 raíz frondosa del árbol de la esperanza
 raíz soy y quiero ser árbol y hojas y darte fruto.

Soy sol
 quemante, soy de fuego y mi palabra de hierro quema oídos intoxicados
 soy sol y quiero compartirme mi luz como mi luna
 hago la piel del color que soy, camino y necesario soy
 indispensables mi crepúsculo y mi ocaso,
 descanso acaso,
 nuevo día soy.

Soy luna
 fragancia visual y nocturna, eternamente femenina,
 soy reposo de sol,
 soy mirada de conejo,
 soy el aullido del coyote,
 cuna de niño, pestaña nocturna,
 presagio, herramienta de suerte y alquimia,
 en octubre la más bella,
 soy luna lunera, espuma de estrella y estrella soy

Soy sangre
 sangre de muchos años,
 de muchos hombres,
 sangre derramada por propios y extraños.
 Sangre de resistencia, tinta de la estrella roja,
 soy sangre del gigante,
 de la historia soy parte,
 de las batallas soy parte,
 de las traiciones soy parte,
 del silencio y del abandono,
 soy sangre de la fiesta, sangre del mar, de selva, de llano,
 de sierra, de ciudad, soy fuerza, soy indio, soy sangre de la tierra
 (*Miak tonati panojka, Miakin xouimen nojkia yajkenya,*
Uan nopa estli nojuan tech kokoa)¹

Soy agua
 triste fiera
 agua de mi ojo y de mi cara
 agua de mi cuerpo seducida por la luna
 el espejo del coyote
 jugo de caña
 transparente transpiración
 soy sudor que siembra tierra
 lluvia, arroyo, atlajko mi tierra partida en dos

SOY TÚ.**Irma Pineda**

¹ Muchos días han pasado muchos años ya se fueron y su sangre nos sigue doliendo.

CONTENIDO

I.	ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
II.	ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
1.	RESUMEN.....	1
2.	INTRODUCCIÓN.....	3
	2.1. CAMBIO CLIMÁTICO.....	3
	2.1.2. Modelos de Circulación General.....	5
	2.2. CAMBIO CLIMÁTICO Y BIODIVERSIDAD.....	7
3.	ANTECEDENTES.....	10
	3.1. LA DISTRIBUCIÓN DE LAS ESPECIES.....	10
	3.2. EL NICHOS ECOLÓGICO.....	12
	3.2.1. El Modelado del Nicho Ecológico y El Cambio Climático.....	13
	3.3. ESPECIES DE ESTUDIO.....	15
	3.3.1. <i>Lepus callotis</i> (Wagler, 1830).....	17
	3.3.2. <i>Sylvilagus cunicularius</i> (Waterhorse, 1848).....	18
4.	OBJETIVOS.....	22
	4.1. OBJETIVO GENERAL.....	22
	4.2. OBJETIVOS PARTICULARES.....	22
5.	HIPÓTESIS.....	23
6.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	24
	6.1. MODELADO DE LA DISTRIBUCIÓN DE LAS ESPECIES.....	24
	6.1.1. Bases de Datos de Localidades.....	24
	6.1.2. Preparación de las Capas Climáticas.....	25
	6.1.3. Modelado de Nichos Ecológicos.....	26
	6.2. ESCENARIO CLIMÁTICO ACTUAL.....	29
	6.2.1. Poder Predictivo de los Modelos.....	30
	6.2.1.1. Muestreo en Campo de <i>Lepus callotis</i>.....	31
	6.2.1.2. Muestreo en Campo de <i>Sylvilagus cunicularius</i>.....	31
	6.3. ESCENARIOS CLIMÁTICOS FUTUROS Y DE DISPERSIÓN.....	32
	6.4. MODELOS DEL ÁREA DE DISTRIBUCIÓN POTENCIAL.....	33
	6.4.1. Presencia Potencial de las Especies.....	34

7.	RESULTADOS.....	35
	7.1. ESCENARIO CLIMÁTICO ACTUAL.....	35
	7.1.1. Evaluación del Poder Predictivo de los Modelos.....	37
	7.2. ESCENARIOS CLIMÁTICOS FUTUROS Y DE DISPERSIÓN.....	42
	7.3. COMPARACIÓN DE LOS MODELOS DE DISTRIBUCIÓN POTENCIAL.	49
8.	DISCUSIÓN.....	52
9.	CONCLUSIONES.....	59
10.	LITERATURA CITADA.....	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1	Distribución de <i>Lepus callotis</i> y <i>Sylvilagus cunicularius</i> en México (Hall, 1981).	20
Fig. 2	Proceso para la georreferenciación de las localidades de registro de <i>L. callotis</i> y <i>S. cunicularius</i> , y la preparación de las capas climáticas de las variables ambientales.	25
Fig. 3	Procedimiento desarrollado por GARP para la generación de los modelos de nicho ecológico (GARP = Genetic Algorithm for Rule-set Prediction).	28
Fig. 4	Procedimiento para generar los modelos de distribución potencial de <i>Lepus callotis</i> y <i>Sylvilagus cunicularius</i> .	30
Fig. 5	Modelo de distribución del nicho ecológico de <i>Lepus callotis</i> , para el escenario climático actual.	35
Fig. 6	Modelo de distribución del nicho ecológico de <i>Sylvilagus cunicularius</i> , para el escenario climático actual.	36
Fig. 7	Modelo de distribución del nicho ecológico de <i>Lepus callotis</i> , para el escenario climático actual y localidades de verificación.	37
Fig. 8	Modelo de distribución del nicho ecológico de <i>Sylvilagus cunicularius</i> , para el escenario climático actual y localidades de verificación.	42
Fig. 9	Modelos de distribución del nicho ecológico de <i>Lepus callotis</i> para los escenarios climáticos actual, del año 2010 y 2050, sin dispersión (a) y con dispersión universal (b).	45
Fig. 10	Modelos de distribución del nicho ecológico de <i>Sylvilagus cunicularius</i> para los escenarios climáticos actual, del año 2010 y 2050, sin dispersión (a) y con dispersión universal (b).	48
Fig. 11	Área potencial de distribución (km ²) de las dos especies en los diferentes escenarios climáticos y de dispersión (s/D= sin dispersión, D = dispersión	50

universal).

Fig. 12	Áreas de distribución potencial actual, de permanencia y potencialmente habitables (APH), de las dos especies en los dos escenarios climáticos futuros con dispersión universal.	51
Fig. 13	Áreas de permanencia simpátrica de <i>Lepus callotis</i> y <i>Sylvilagus cunicularius</i> bajo los tres escenarios climáticos.	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Variables ambientales utilizadas para generar los modelos de distribución potencial de las especies <i>Lepus callotis</i> y <i>Sylvilagus cunicularius</i> .	26
Tabla 2.	Localidades de muestreo para la verificación del modelo de distribución potencial actual de <i>Lepus callotis</i> .	38
Tabla 3.	Localidades de muestreo para la verificación del modelo de distribución potencial actual de <i>Sylvilagus cunicularius</i> .	40

1. RESUMEN

EFFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DISTRIBUCIÓN ESPACIO- TEMPORAL DE DOS LAGOMORFOS EN MÉXICO.

La distribución geográfica de los organismos está fuertemente determinada por el clima, es por ello que se esperan importantes efectos debido al cambio climático. Un aspecto crítico dentro de este proceso es entender las consecuencias del cambio climático sobre la biodiversidad, particularmente en la forma y magnitud de los efectos que se pueden esperar en su distribución espacial. En México existen varias especies de lagomorfos (conejos y liebres) con requerimientos ecológicos distintos. Entre ellas, *Lepus callotis* (liebre torda), cuasi-endémica, que habita zonas áridas del norte y centro de México y *Sylvilagus cunicularius* (conejo montés), endémico, de distribución principalmente montana. Con base en estudios teóricos y empíricos realizados anteriormente con otros grupos de organismos, se puede esperar que estas especies respondan al cambio climático mediante movimientos en sus distribuciones geográficas. Para evaluar este efecto se compilaron localidades de registro de *L. callotis* y *S. cunicularius* que fueron georreferenciadas en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Utilizando estas localidades se analizó la distribución geográfica de estas especies bajo condiciones ambientales actuales a través de modelos de nicho ecológico generados con el programa Genetic Algorithm for Rule-set Production (GARP). Con los modelos del área de distribución potencial (ADP) actual se eligieron los sitios donde se realizaron los muestreos de campo para evaluar el poder predictivo de los modelos del ADP actual. Posteriormente, las ADP actuales fueron proyectadas a escenarios climáticos futuros (años 2010 y 2050) bajo dos escenarios de dispersión – uno de no dispersión y el otro de dispersión universal – para conocer los posibles efectos extremos del cambio climático en sus distribuciones geográficas. Los resultados mostraron efectos potenciales diferenciales en las distribuciones geográficas de estas especies, ya que las ADP mostraron para la liebre una contracción hacia el oeste de su distribución, mientras que se observó una expansión en el ADP del conejo con desplazamientos hacia mayores altitudes. Finalmente, con el análisis e integración del ADP actual y futura se obtuvo un panorama general de los posibles efectos del cambio climático en la distribución de estos dos lagomorfos.

Palabras clave: Cambio climático, *Lepus callotis*, *Sylvilagus cunicularius*, lagomorfos, área de distribución potencial, GARP, SIG, México.

1. ABSTRACT

EFFECT OF THE CLIMATIC CHANGE IN THE DISTRIBUTION SPACE-TEMPORAL OF TWO LAGOMORPHS IN MEXICO.

Species' geographic distributions are strongly driven by climate, thus current and future climatic changes are expected to impact them importantly. A key aspect in this topic is to understand climate change consequences on biodiversity, particularly in the direction and magnitude of species' ranges. Mexico holds an important diversity of lagomorphs (rabbits and hares), some with very unique ecological requirements; for instance, the almost-endemic white-sided jackrabbit (*Lepus callotis*) that inhabits natural grasslands of the northern deserts, and the endemic Mexican rabbit (*Sylvilagus cunicularius*), which lives mainly in the upper lands in Central Mexico. Previous studies regarding the potential responses of biodiversity to climate change, make me hypothesize that these two species respond to it by shifting their current range differently. To test this hypothesis, I compiled and georeferenced record localities of the two species and I estimated the current distribution of the two species via modeling their ecological niches using the Genetic Algorithm for Rule-set Production (GARP), and field samplings were carried out to determine the predictive power of distribution models. Ecological niche models were then projected onto future climatic scenarios (2010 and 2050) to investigate the potential effects of climate change on both species under two contrasting dispersal scenarios (universal and no dispersion). Results indicate that potential effects of climate change are different for each species since *Lepus callotis* might observe an important range contraction, mainly towards the western portion; whereas *Sylvilagus cunicularius* is expected to suffer and upper shift of its distribution. This study presents a general view of the potential effects of climate change over the distribution of these species.

Key words: Climatic change, *Lepus callotis*, *Sylvilagus cunicularius*, lagomorphs, area of distribution, GARP, SIG, Mexico.

2. INTRODUCCIÓN

2.1. CAMBIO CLIMÁTICO

El cambio climático se encuentra inmerso en el fenómeno conocido como cambio global. Vitousek (1992) define al cambio global en dos grandes contextos:

1. Es un fenómeno que altera las capas de fluidos del sistema de la Tierra (la atmósfera y los océanos) y que, por lo tanto, se experimenta a escala planetaria (i.e., el cambio en la composición de la atmósfera, el cambio climático, la destrucción de la capa de ozono en la estratosfera y el aumento de la incidencia de radiación ultravioleta).
2. El otro contexto, implica la ocurrencia del evento en sitios muy localizados, pero tan ampliamente distribuidos que constituye un cambio a nivel global (i.e., la pérdida de la diversidad biológica, el cambio de uso de suelo, los cambios en la química atmosférica y las invasiones biológicas).

Hace diez años se decía que el cambio de uso de suelo era el componente del cambio global más importante, pero que a largo plazo, el cambio climático tenía el mayor potencial para alterar el funcionamiento de la Tierra, al tener una mayor interacción con los otros componentes del cambio global (Jaramillo 1994). Actualmente, el cambio climático parece ser el componente más importante por su influencia en la disponibilidad de agua dulce, la producción agropecuaria y ganadera, el fenómeno de “El Niño”, los

desastres naturales y las enfermedades (Magaña y Gay 2002). El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) define al cambio climático como “cualquier cambio del clima en el transcurso del tiempo, ya sea por razón de su variabilidad natural o como resultado de actividades humanas”. El cambio del clima puede deberse a procesos naturales internos a fuerzas externas, a cambios antropogénicos duraderos en la composición de la atmósfera o en el uso del suelo (IPCC 1995, Magaña et al. 2004, Ruiz y Cruz 2004). Este cambio climático es una de las manifestaciones del calentamiento global, que es producido por el incremento en la concentración de diversos gases en la atmósfera, conocidos como de efecto invernadero, entre los que se encuentran: el bióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O), el ozono (O_3), el bióxido de azufre (SO_2) y los clorofluorocarbonos (CFC).

La radiación procedente del sol consta de longitudes de onda muy cortas, la mayoría de las cuales en vez de transmitirse libremente por la atmósfera son absorbidas por la superficie terrestre. La superficie de la Tierra reirradia a la atmósfera la energía solar absorbida en forma de onda larga o de energía térmica. El vapor de agua y el CO_2 atmosférico atrapan esta energía térmica, calentando la superficie de la Tierra. Las actividades humanas, que desde la revolución industrial intensificaron el uso de combustibles fósiles y la destrucción de muchos sistemas ecológicos que aportan un equilibrio dinámico de gases en la atmósfera, han hecho que la acumulación de bióxido de carbono alcance niveles que no se registraban en la tropósfera desde hace 200,000 años (IPCC 1995, Ordóñez 1999, Ruiz y Cruz 2004).

En las últimas dos décadas del siglo pasado hubo grandes avances en la comprensión del origen del cambio climático. Las crecientes evidencias de sus

implicaciones ambientales, sociales y económicas a nivel nacional, regional y global han hecho que el sector científico participe más y que los gobiernos del mundo lo tomen en cuenta dentro de sus planes de desarrollo (IPCC 1995, Ordóñez 1999, Magaña et al. 2004).

En la reunión internacional “La cumbre de la Tierra”, realizada en Río de Janeiro en 1992, dio oportunidad a las naciones de tocar el tema a nivel menos enmarcado en un contexto científico y más generalizado hacia cambios en los planes de desarrollo. La conciencia de la comunidad no especializada, tomó más tiempo, transformándose de un tema científico y político, a un fenómeno que repercute en las actividades cotidianas, como una mayor impredecibilidad del estado del tiempo. El irregular comportamiento del clima poco a poco ha ayudado a que el público en general tome conciencia del cambio climático. Sin embargo, existen otros efectos del cambio climático que no se pueden percibir a simple vista, como las alteraciones en los patrones y procesos de los sistemas naturales (Jaramillo 1994).

2.1.2. Modelos de Circulación General

Existen diversos programas de computación producidos por diferentes grupos de trabajo para simular la influencia de los gases de invernadero sobre los patrones del clima a gran escala. Estas simulaciones son conocidas como Modelos de Circulación General (GCM, General Circulation Models). Cada grupo de trabajo (Geophysical Fluids Dynamic Laboratory, Canadian Climatic Centre, etc.) utiliza diferentes algoritmos y parametrizaciones para las simulaciones, con lo cual, las predicciones que surgen de estos diferentes modelos difieren

en magnitud pero tienen ciertos patrones en común: todos los modelos predicen un aumento en la temperatura media así como un correspondiente aumento en las precipitaciones a nivel global; además, estos cambios tienden a no distribuirse uniformemente sobre la superficie de la Tierra (IPCC 1995, Magaña 2004).

El IPCC (1995) indica que el promedio de temperatura de la superficie en todo el mundo aumentó en 0.6 ± 0.2 °C durante el siglo XX y que, en la serie de escenarios elaborados por el Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones (IEEE), se pronostica que el promedio de temperatura del aire en la superficie de todo el mundo aumente aún más. Además, se espera que el promedio del nivel de la superficie del mar aumente de 0.09 a 0.88 m para el año 2100. Estas proyecciones indican que el calentamiento variará de una región a otra y que estará acompañado de incrementos y disminuciones de precipitación. Además, se presentarán modificaciones en la frecuencia e intensidad de algunos fenómenos climáticos extremos, como lluvias torrenciales, huracanes, tornados, etc. (IPCC 1995).

Aunque el papel de los gases invernadero en el calentamiento de la superficie de la Tierra es bien conocido, la influencia específica que puede tener la duplicación de la concentración de CO₂ en la atmósfera sobre el sistema climático global es incierta. La investigación actual del calentamiento por el efecto invernadero se concentra en la respuesta biológica a todos los niveles de organización: individuos, poblaciones, comunidades y ecosistemas. De acuerdo con estos trabajos los cambios en la temperatura y en la disponibilidad de agua ejercerán un efecto indirecto sobre la distribución y abundancia de muchas especies.

2.2. CAMBIO CLIMÁTICO Y BIODIVERSIDAD

El IPCC estima que un cambio en las emisiones de gases de efecto invernadero que duplique las concentraciones de CO₂ con respecto al nivel preindustrial (280 ppm), dará como resultado un incremento de la temperatura media global entre 1.5 y 5.8 °C hacia el año 2100. Es probable que el índice y la duración del calentamiento en el siglo XX sea más amplio que en cualquier otro período durante el último milenio. El período más reciente de calentamiento global ocurrió a partir de la década de los 70's (1976 a 1999). Los años noventa parecen haber sido el decenio más cálido del milenio en el hemisferio norte y probablemente 1998 fue el año más cálido. Los mayores aumentos de temperatura se produjeron en las latitudes altas y medias del hemisferio norte (IPCC 1995).

Las alteraciones climáticas están afectando la biodiversidad de diferentes maneras a nivel mundial (Dobson y Rubenstein 1989). Todos los organismos son influenciados por el clima, modulando la sincronización de sus ciclos vitales (períodos de crecimiento, reproducción e hibernación), determinando su distribución geográfica y abundancia. Los umbrales fisiológicos y ecológicos (donde la especie puede sobrevivir y reproducirse) condicionan la distribución de las especies.

En teoría, ante un cambio ambiental drástico, las especies silvestres pueden responder de tres maneras (Holt 1990):

- 1) Modifican sus distribuciones geográficas, siguiendo las condiciones ecológicas óptimas para su existencia (i. e., su nicho ecológico).

2) Permanecen en el mismo lugar, y dependiendo de su plasticidad genética se adecúan a las nuevas condiciones existentes.

3) Cuando las especies no han podido responder de una u otra forma, entonces tenderán a extinguirse (Graham et al. 1996, Brown y Lomolino 1998, Martínez-Meyer 2002).

Ante un inminente calentamiento global, se ha sugerido que las tendencias de desplazamiento de combinaciones climáticas y, por ende, de las especies, sean hacia latitudes y altitudes mayores (Peters y Lovejoy 1992). En estudios de campo, este tipo de respuestas ya fueron observadas en especies fisiológicamente sensibles a los cambios de temperatura, como son mariposas y plantas (Parmesan 1996, Parmesan et al. 1999, Thomas y Lennon 1999, Warren et al. 2001). Otros estudios que incluyen el modelado del nicho ecológico de las especies, han permitido predicciones robustas de las distribuciones de las especies bajo condiciones ambientales alteradas (Gottfried et al. 1999, Price 2000, Peterson et al. 2001, Peterson et al. 2002). El conocimiento de la distribución de las especies y su modificación son elementos que deben tomarse en cuenta para la toma de medidas de mitigación que se deben de adoptar ante el cambio climático (IPCC 1995, Arriaga y Gómez 2004, Villers y Trejo 2004).

Actualmente no existen estudios que combinen el modelado y los estudios de campo, de tal manera que permitan la generación de hipótesis sobre la dirección y magnitud del cambio en las distribuciones de las especies y la verificación de dichas hipótesis (Newton et al. 2000, Warren et al. 2001). Ante la necesidad de generar información sobre los posibles efectos del

cambio climático en la distribución de las especies, en este trabajo se seleccionaron dos especies de mamíferos endémicos mexicanos (*Lepus callotis* y *Sylvilagus cunicularius*) con los cuales se realizó el modelado de sus nichos ecológicos y su evaluación mediante muestreos de campo, para dar un panorama más preciso del efecto del cambio climático en la distribución de las especies. Este es el primer estudio del efecto del cambio climático en la distribución del grupo de los lagomorfos.

3. ANTECEDENTES

3.1. LA DISTRIBUCIÓN DE LAS ESPECIES

Los estudios biológicos, biogeográficos y ecológicos deben delimitar en primer instancia el área de distribución geográfica de las especies. Por ejemplo, para el establecimiento de estrategias efectivas en la conservación de la biodiversidad se debe tener un conocimiento mínimo de la misma (Sánchez-Cordero et al. 2001). La creciente necesidad de establecer de manera rápida y confiable los límites de la distribución de las especies dentro del ámbito de la conservación de la biodiversidad y los criterios para el establecimiento de zonas prioritarias a conservar, incrementan la importancia de los métodos empleados para la delimitación del área geográfica (Vane-Wright et al. 1991, Morrone y Crisci 1992, Vargas 1993, Peterson y Cohoon. 1999, Anderson et al. 2002).

Los primeros métodos para representar gráficamente la distribución de las especies consistieron en la construcción de polígonos sobre un mapa, los cuales contuvieran todos los puntos de registro de la especie estudiada. Los criterios utilizados para trazar esta área de distribución varían según las preferencias del investigador (Rapoport 1975). Otras técnicas usadas incluyen: el polígono convexo mínimo, el método de gradilla y el de la propincuidad media (Rapoport y Monjeau 2001, Espinosa-Organista et al. 2002). El método del polígono convexo mínimo consiste en trazar un polígono que conecte los puntos más externos del registro de la especie. El método de gradilla consiste en realizar una división del área en retículas o celdas con determinado tamaño, en la cual si un punto de registro de la especie queda

dentro de una de las celdas, esta área será considerada como parte de la distribución de la especie (Rapoport 1975, Rapoport y Monjeau 2001, Espinosa-Organista et al. 2002). El método de la propincuidad media comprende un análisis estadístico donde al final se trazará un círculo alrededor de cada uno de los puntos de registro de la especie en cuestión y se fusionarán todos los bordes de estos círculos para generar una sola área. El radio de estos círculos concéntricos representará una desviación estándar de la distancia promedio entre cada uno de los puntos de registro de la especie. (Rapoport 1975, Rapoport y Monjeau 2001, Espinosa-Organista et al. 2002).

Adicional a estos métodos para delimitar las áreas de distribución de las especies, también se utiliza la generación de modelos que relacionan la presencia de las especies con las características ambientales de una región (modelos del nicho ecológico de las especies), a partir de métodos heurísticos, tales como, los árboles de decisión (Stockwell et al. 1990 y Moore et al. 1991) y redes neuronales. Además de métodos estadísticos como los modelos lineales generalizados (GLIM, Austin et al. 1990) y los Bayesianos de clasificación (Stockwell 1993). Otros autores han desarrollado programas para análisis particulares, como BIOCLIM para las envolturas bioclimáticas (Nix 1986), DOMAIN para el índice de Gower (Carpenter et al. 1993), BIOMAPER para un análisis de factores (Hirzel et al. 2002) y GARP para un algoritmo genético (Stockwell y Noble 1992).

3.2. EL NICHU ECOLÓGICO

A lo largo del tiempo se han desarrollado diversos conceptos de nicho ecológico, que reflejan posturas que difieren principalmente por la disciplina de trabajo en la cual se está aplicando el concepto (Schoener 1989).

Joseph Grinnell (1917) en sus trabajos realizados entre la primera y tercera década del siglo XX (Grinnell, 1904, 1914, 1917, 1924 y 1928), propuso que la unidad última de distribución de una especie era su nicho ecológico y estaba determinado por la relación de las especies con el alimento y sus depredadores. Autores como Krebs (1978), al simplificar esta idea originaron que el nicho definido por Grinnell fuera equivalente al concepto de hábitat (Vandermeer 1972, Schoener 1989), que es “el lugar donde vive realmente un organismo” y que se refiere a una localización, a una ubicación que se puede definir a diferentes niveles o escalas (Smith y Smith 2001).

Charles Elton (1927) le dio mayor importancia a las relaciones inter-específicas de un organismo al definir el nicho ecológico de una especie. Para este autor, el nicho se refiere a la función que realiza una especie dentro de la trama trófica de una comunidad. Mencionó que en diferentes comunidades existen organismos que ocupaban una función específica y equivalente dentro de la red alimenticia de cada comunidad, se refirió a esta función como la “profesión” de la especie.

G. Evelyn Hutchinson (1957) no le dio mayor importancia a una variable biótica o abiótica en particular, explicó su percepción de nicho dando como ejemplo la representación sobre un eje de una variable (sea biótica o abiótica) que influye en una especie y su intervalo de tolerancia a la misma, después agregó un segundo eje que corresponde al intervalo de tolerancia de una

segunda variable. En este momento el sistema adquiere un carácter bidimensional. Al incluir una tercera variable con otro eje se tiene un sistema tridimensional y de esta manera se continuaría con la inclusión de más variables. Hutchinson concluyó que si fuera posible representar las n-variables bióticas y abióticas que influyen en la persistencia de una especie, se generaría un espacio abstracto n-dimensional ó hipervolumen que representa el nicho ecológico fundamental de una especie. La parte de este hipervolumen que está habitado en un plano geográfico (biotopo), después de la influencia de la interacción negativa de la especie con otras especies, conforma el nicho ecológico materializado (*realised*) de la especie.

3.2.1. El Modelado del Nicho Ecológico y El Cambio Climático

La predicción de la distribución de las especies con la generación de modelos de nichos ecológicos se ha convertido en una herramienta de aplicación en diferentes áreas, como la biogeografía, evolución, ecología, conservación y manejo de especies invasoras (Sánchez-Cordero et al. 2002, Navarro et al. 2003, Anderson et al. 2003). Thomas y colaboradores (2004), realizaron el modelado de la distribución potencial de taxones pertenecientes a diversas partes del mundo y sus riesgos de extinción, relacionando la pérdida de hábitat para los años de 2050 y 2100, con el cambio climático. Calcularon que la proporción de especies extintas podría ser entre 33% y 58%.

El grupo de trabajo II del IPCC generó un resumen donde señala el efecto del cambio climático sobre los sistemas naturales y humanos. De la integración de este informe surgen conclusiones que atienden a cada una de las distintas dimensiones de los impactos, adaptación y vulnerabilidad al

cambio climático (IPCC 2001). En México, sólo el 6% de los estudios de vulnerabilidad están enfocados hacia la biodiversidad y su relación con el cambio climático, y sólo el 3% de éstos se dedican a la generación de modelos (SID-UNAM 2002).

Para la biota de México se tienen algunos trabajos. Entre éstos se mencionan el desarrollado por Villers-Ruiz y Trejo-Vázquez (1998) en el cual evaluaron el efecto del cambio climático en bosques de 33 áreas naturales protegidas (ANPs) de México, comparando los tipos de climas y vegetación presentes en el tiempo actual y los que se presentarían bajo dos escenarios climáticos futuros. Se afirma que 24 de estas ANPs tendrían cambios en el tipo de vegetación original y que las regiones más afectadas se encontrarían en el norte, oeste y sur del país. Téllez-Valdés y Dávila-Aranda (2003) analizaron los cambios en la distribución potencial presente de 20 especies de la familia Cactaceae en la Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán, bajo tres escenarios climáticos futuros combinando incrementos en la temperatura y disminución en el porcentaje de precipitación. Observaron diferentes respuestas en cuanto al área de distribución futura de las especies tales como la disminución, contracción, expansión y que en algunos casos las áreas de distribución de las especies salían de los límites de la Reserva; resaltando así la importancia de este tipo de evaluaciones del efecto del cambio climático para una mejor planeación de los límites de las áreas de protección que consideren los cambios a futuro.

Con referencia a especies animales, el trabajo realizado por Peterson y colaboradores (2000), contempló un análisis geográfico para aves endémicas y mamíferos de Veracruz, donde se evalúa la efectividad del tamaño y distribución de los parques nacionales de este estado y el efecto que tendrá el

cambio climático sobre la protección de las especies. En otro trabajo se modeló el efecto del cambio climático sobre la distribución de ocho especies de la familia de aves Cracidae (Peterson et al. 2001), en la cual se predice que las ocho especies bajo un escenario sin posibilidades de dispersión declinarían, en tanto que ante un escenario de dispersión sólo dos de estas especies declinarían, mientras que las seis restantes expandirían sus áreas de distribución. Peterson y colaboradores (2002), realizaron las proyecciones de las distribuciones potenciales de un total de 1870 especies entre aves, mamíferos y mariposas de México con la influencia del cambio climático. Los investigadores llegaron a la conclusión de que para los años de 2055 se esperaría una modificación de las distribuciones de más del 40% de las especies. Por ultimo, se realizó la proyección de las áreas de distribución potencial de dos especies de salamandras pertenecientes al genero *Pseudoeurycea* del centro de México, con escenarios de cambio climático esperados dentro de 50 años y la influencia de los efectos de deforestación junto con una capacidad limitada de dispersión de las especies. En el caso más severo, se observó una pérdida en el área de distribución histórica de las especies de alrededor del 75% siendo mayor el efecto si se toma en cuenta la influencia de la deforestación actual para el modelado de las distribuciones futuras (Parra-Olea et al. 2005).

3.3. ESPECIES DE ESTUDIO

En México existen 15 especies de lagomorfos, ocho de las cuales son endémicas. Cinco de las 15 especies pertenecen al género *Lepus* (liebres),

nueve al *Sylvilagus* (conejos) y una al género *Romerolagus* (conejo zacatuche) (Cervantes y González 1996, Ruedas, 1998). México ocupa el quinto lugar mundial y el primero en el continente americano en diversidad de este grupo (Chapman y Flux 1990, Cervantes 1993). Sin embargo, a pesar de su importancia ecológica, económica, sanitaria y cultural, se cuenta con poca información acerca de la biología y el estado de las poblaciones silvestres de la mayoría de estas especies (Cervantes, 1993, Cervantes et al. 2002).

Los lagomorfos, por su talla mediana y relativamente alta abundancia, tienen gran importancia dentro de los ecosistemas terrestres al conformar la base de la cadena alimenticia de los pequeños y medianos depredadores, serpientes, aves rapaces, coyotes, zorras y lince (Ceballos y Galindo 1984, Chapman y Flux 1990, Cervantes 1993). Adicionalmente, el consumo que realizan de las partes vegetativas y reproductivas de pastos, herbáceas, arbustos e incluso árboles juveniles, ayuda a la regulación poblacional y dispersión de algunas de estas plantas (Chapman y Flux 1990, Cervantes 1993). Tanto liebres como conejos, representan una fuente de alimento para las comunidades rurales del país y son un recurso con valor cinegético, ya que siete de las 15 especies están autorizadas para su aprovechamiento (Cervantes 1993, Villa y Cervantes 2003).

Los lagomorfos también pueden causar daños agrícolas y ganaderos por su elevado consumo de plantas cultivadas de interés económico y de pastizales destinados para el ganado. Son hospederos de vectores transmisores de enfermedades como la tularemia (*Pasteurella tularensis*) y la peste (*Yersinia pestis*), que pueden ser transmitidas al hombre, y además causan pérdidas económicas en el sector de la silvicultura y bajas en las poblaciones de conejos silvestres (Cervantes 1993, Villa y Cervantes 2003).

3.3.1. *Lepus callotis* (Wagler, 1830)

Es una especie cuasi-endémica de México que se distribuye desde el suroeste de Nuevo México (E.U.A) hasta el norte de Oaxaca (Hall 1981, Best y Travis 1993, Villa y Cervantes 2003). Cuenta con dos subespecies: *L. callotis galliardi*, que es compartida con la región del suroeste de Nuevo México y las planicies centrales del estado de Chihuahua y norte de Durango. *L. callotis callotis* se distribuye desde la parte central del este de Durango hacia las planicies de la parte central de México, atravesando el Eje Neovolcánico hasta el norte de Guerrero y Oaxaca (Best y Travis 1993, Villa y Cervantes 2003) (Fig.1). El intervalo altitudinal en el cual ocurre la especie es desde los 750 a los 2,550 msnm (Best y Travis 1993). Los nombres comunes de esta especie son liebre torda y liebre panza blanca. Su nombre en inglés es white-sided jackrabbit.

La mayor actividad de *Lepus callotis* se concentra durante la noche y el crepúsculo. Durante el día busca sombras donde poder hacer un echadero para protegerse del sol y depredadores, como coyotes, zorras y aves rapaces (Villa y Cervantes 2003). En algunas regiones es simpátrica con la liebre cola negra (*Lepus californicus*) (Hall 1981, Best y Travis 1993). Los costados de la liebre torda son blancos y muy evidentes, con la punta de la parte dorsal de las orejas blanca, mientras que *L. californicus* la tiene negra (Hoffmeister 1986). A diferencia de *L. californicus*, es frecuente ver a *L. callotis* en parejas, especialmente en la época reproductiva (Villa y Cervantes 2003).

Es frecuente encontrar a *Lepus callotis* en pastizales abiertos y áreas planas con poca cobertura arbustiva, sin embargo, diversas actividades humanas han ocasionado modificaciones en su distribución (Matson y Baker

1986, Best y Travis 1993, Villa y Cervantes 2003). Se ha encontrado que la densidad poblacional de *L. callotis* decrece conjuntamente con la densidad y el vigor de los pastizales; en tanto que el incremento en la cobertura herbácea y arbustiva favorecen la presencia de *Lepus californicus* y *Sylvilagus audubonii* (Berdnarz y Cook 1984). *L. californicus* se encuentra en sitios donde los arbustos y las herbáceas son la vegetación dominante, siendo más favorecida por el sobrepastoreo y el deterioro de la vegetación del pastizal en comparación con *L. callotis* (Baker y Green 1962, Conway 1976, Findley 1987).

En estados como Durango y Zacatecas, el sobrepastoreo ha desplazado las poblaciones de *Lepus callotis* hacia pastizales moderadamente pastoreados. En Zacatecas, anteriormente era común encontrar esta liebre en pastizales planos abiertos; sin embargo, actualmente se les encuentran con más frecuencia al pie de colinas o en claros forestales de tierras altas de la parte suroeste del estado (Matson y Baker 1986, Villa y Cervantes 2003). En Guerrero, *L. callotis* se ha asociado a potreros y áreas cultivadas (Best y Travis 1993). Se ha observado en trigales o maizales, cerca de áreas adyacentes a matorral espinoso y en pastizales cerca de matorrales de encino y en valles abiertos cultivados (Villa y Cervantes 2003).

3.3.2. *Sylvilagus cunicularius* (Waterhorse, 1848)

Es conocido comúnmente como conejo montés, conejo serrano y en inglés como Mexican cottontail. En México existen 9 especies dentro del género *Sylvilagus*, de las cuales el conejo montés es la de mayor tamaño (Aranda 2000).

Sylvilagus cunicularius es endémica de México y su distribución se extiende desde la porción media del estado de Sinaloa abarcando la costa del Pacífico hasta Oaxaca, incluyendo el Eje Neovolcánico y oeste de Veracruz (Aranda 2000, Villa y Cervantes 2003) (Fig.1). Presenta tres subespecies: *S. cunicularius cunicularius* que habita en la porción central del país en el Eje Neovolcánico hasta la porción media de los estados de Michoacán, Guerrero y Oaxaca; *S. cunicularius insolitus* que se presenta desde la porción media del estado de Sinaloa por toda la Planicie Costera del Pacífico hasta el centro y sur del estado de Jalisco; y *S. cunicularius pacificus* que ocurre desde el sur del estado de Jalisco por la Planicie Costera del Pacífico hasta el sur de Oaxaca. *S. cunicularius* habita tierras áridas bajas y templadas altas, su distribución altitudinal va desde el nivel del mar hasta cerca de los 3,500 msnm (Hall 1981, Cervantes et al. 1992).

Habita bosques de pino, pino-encino y bosque tropical caducifolio, ocasionalmente puede establecerse en campos de cultivo (Ceballos y Galindo 1984, Cervantes et al. 1992, Villa y Cervantes 2003). En Guerrero es común en los valles áridos de los bazos interiores y está asociado con áreas cultivadas y pastos (Villa y Cervantes 2003). En las zonas altas del Eje Neovolcánico puede coexistir con el conejo zacatuche (*Romerolagus diazi*), en tanto que en el resto de su distribución (excepto el estado de Guerrero) es simpátrico con el conejo castellano (*Sylvilagus floridanus*). Se les puede encontrar activos tanto de día como de noche. Construye madrigueras en galerías subterráneas cavadas por él mismo o por otro animal (Aranda 2000). Sus principales depredadores son el coyote, la zorra, el linco, aves rapaces y cuando son crías, serpientes (Cervantes et al. 1992, Ceballos y Miranda 2000, Villa y Cervantes 2003).

La pérdida de hábitat, el sobrepastoreo, la tala inmoderada y la caza ilegal, son factores que perjudican a las poblaciones silvestres de esta especie (Chapman y Flux 1990, Ceballos y Miranda 2000, Villa y Cervantes 2003).

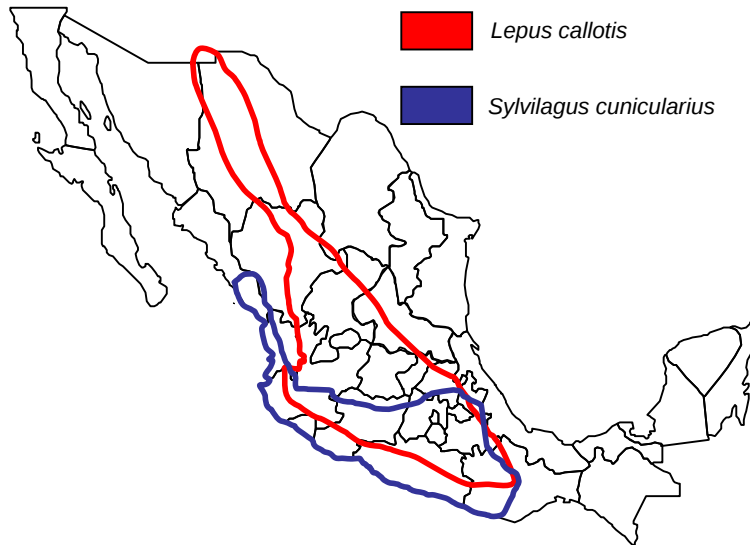


Fig. 1 Distribución de *Lepus callotis* y *Sylvilagus cunicularius* en México (Hall 1981)

Las especies descritas anteriormente tienden a habitar ambientes montanos (*Sylvilagus cunicularius*) y de planicies (*Lepus callotis*). Trabajos relacionados con organismos que comparten la preferencia por estos hábitat reportan mayores modificaciones del área potencial de las especies que habitan en planicies. Peterson (2003a), analizó cinco especies de aves que habitan en las Grandes Planicies de Norteamérica y encontró modificaciones su distribución, que incluían colonizaciones hacia la parte norteña de su distribución y extinciones hacia el sur, posiblemente asociadas al cambio climático global. El mismo autor analizó las modificaciones en el área de distribución debidas al cambio climático entre aves que habitan áreas

montañosas y de planicies, evidenciando una mayor modificación en la distribución de las especies de planicies que en las de montaña (Peterson, 2003b). Adicionalmente, comparó diferentes escenarios de capacidad de dispersión de las especies y encontró pérdidas en el área de distribución de las especies con escenarios de no dispersión de hasta un 35 %.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

- Evaluar el efecto potencial del cambio climático en la distribución espacio-temporal de *Lepus callotis* y *Sylvilagus cunicularius*.

4.2. OBJETIVOS PARTICULARES

- Modelar el nicho ecológico y la distribución geográfica de *Lepus callotis* y *Sylvilagus cunicularius* para las condiciones ambientales actuales.
- Proyectar las distribuciones de *Lepus callotis* y *Sylvilagus cunicularius* a las condiciones climáticas esperadas en los años 2010 y 2050 bajo dos diferentes escenarios de dispersión (universal y sin dispersión).
- Comparar las modificaciones en magnitud de área de la distribución potencial de la especie de planicies (*L. callotis*) y montana (*S. cunicularius*).

5. HIPÓTESIS

Ante un cambio climático que tiende a un calentamiento global generalizado, y siendo *Lepus callotis* una especie que habita en planicies, se esperaría un desplazamiento de sus poblaciones hacia mayores latitudes. En tanto que *Sylvilagus cunicularius*, especie montés, experimentaría un desplazamiento hacia mayores altitudes. Se esperaría que los efectos en la distribución de la liebre fueran más marcados en términos de distancia y magnitud en comparación con los del conejo.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. MODELADO DE LA DISTRIBUCIÓN DE LAS ESPECIES

Se realizó la preparación de las bases de datos y el tratamiento previo de las variables ambientales que comprendió los siguientes procesos:

6.1.1. Bases de datos de localidades históricas

Se compilaron localidades de registro para *Lepus callotis* y para *Sylvilagus cunicularius* procedentes de colecciones científicas y de literatura especializada. En el caso de carecer de las coordenadas de las localidades, se procedió a georreferenciarlas en el Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcView GIS 3.2 (ESRI, 1999), utilizando cartas topográficas digitales de localidades de México con escala 1/250,000 (INEGI, 2000). Con las cartas topográficas se ubicó por el nombre, municipio y estado a la localidad de registro, y tomando en cuenta la distancia (en kilómetros o millas) y orientación reportada (i.e. norte, sur, este, etc.), se ubicaron las coordenadas geográficas del punto de registro de las especies. Se elaboraron bases de datos para *L. callotis* y *S. cunicularius* en las cuales las coordenadas de las localidades de registro se representaron en grados decimales. Estas bases de datos a lo largo de este documento serán nombradas como bases de datos de localidades históricas (Fig. 2).

6.1.2. Bases de datos ambientales

Con las bases de datos de las localidades históricas, se definió el área de estudio para cada especie, trazando en el SIG un polígono a una distancia de 150 y 120 km a partir de las localidades de registro de *Lepus callotis* y *Sylvilagus cunicularius*, respectivamente. Con estas áreas de estudio se cortaron mapas digitales con una resolución de 1km x 1km, correspondientes a los tres escenarios climáticos (actual, año 2010 y 2050) que representaron la temperatura media anual, precipitación anual, orientación de las pendientes, pendiente e índice topográfico, utilizados para modelar los nichos ecológicos de las especies (Fig.2) (Tabla 1).

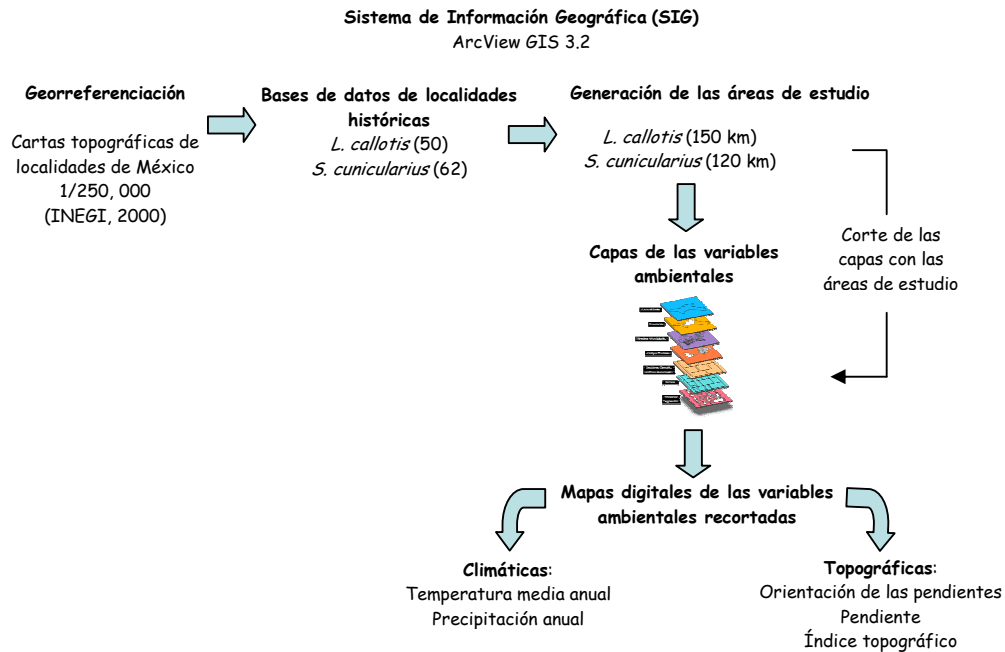


Fig. 2. Proceso para la georreferenciación de las localidades de registro de *L. callotis* y *S. cunicularius*, y la preparación de las capas climáticas de las variables ambientales.

Tabla 1. Variables ambientales utilizadas para generar los modelos de distribución potencial de las especies *Lepus callotis* y *Sylvilagus cunicularius*.

Variables	Escenarios climáticos	
	Actual	Futuros
Ambientales		
Climáticas	- temperatura media anual*	- temperatura media anual +
	- precipitación anual *	- precipitación anual +
Topográficas	- orientación de las pendientes ◇	- orientación de las pendientes +
	- pendiente ◇	- pendiente +
	- índice topográfico ◇	- índice topográfico +

* <http://biogeo.berkeley.edu/worldclim/worldclim.htm>, ◇ <http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30/hydro/>
 + <http://ipcc/ddc.cru.uea.ac.uk/>

6.1.3. Modelado de nichos ecológicos

El modelado de los nichos ecológicos de las especies se realizó utilizando el algoritmo conocido como Genetic Algorithm for Rule-set Prediction (GARP). Es un sistema de inteligencia artificial diseñado para producir una serie de reglas o condicionantes ambientales que definen las condiciones ecológicas en las que una especie se encuentra (i.e., su nicho ecológico), utilizando como información base las localidades de registro de una especie y mapas digitales de diferentes variables ambientales (Stockwell y Peters 1999) (Fig. 3).

El proceso comienza con un re-muestreo de los puntos de colecta y puntos tomados del resto del mapa para generar un total de 2500 puntos divididos equitativamente en puntos de presencia y de pseudoausencia. La mitad de ese universo de datos se utiliza para generar los modelos de nicho

ecológico (datos de entrenamiento) y la otra mitad para validarlos (datos de validación). El modelado comienza cuando GARP selecciona aleatoriamente un método de modelado entre una serie de opciones (regresión logística, BIOCLIM, etc.). Usando los datos de entrenamiento se genera una regla de predicción y se evalúa estadísticamente con los datos del grupo de validación; si el modelo es satisfactorio, la regla ambiental se retiene, sino, se desecha. El proceso se repite hasta generar una serie de reglas ambientales que predicen los datos de validación con un máximo de significancia. Esta serie de reglas se va alterando de manera "genética" (i.e., mediante mutaciones y translocaciones de los elementos de las reglas) para encontrar mejores soluciones; si las modificaciones mejoran el modelo, entonces este nuevo juego de reglas se retiene. Este proceso se repite hasta que los modelos no mejoran más allá de un valor crítico (convergencia), o hasta que se cumplen cierto número de iteraciones (Fig. 3).

Finalmente, el modelo generado en espacio ecológico, es proyectado a un escenario geográfico para detectar los sitios que cumplen con esas condiciones, produciendo así un mapa que se puede interpretar como la distribución potencial de la especie sin considerar el efecto histórico (barreras biogeográficas, procesos de dispersión) y de las interacciones bióticas (competencia, depredación) (Soberón y Peterson 2005) (Fig. 3).

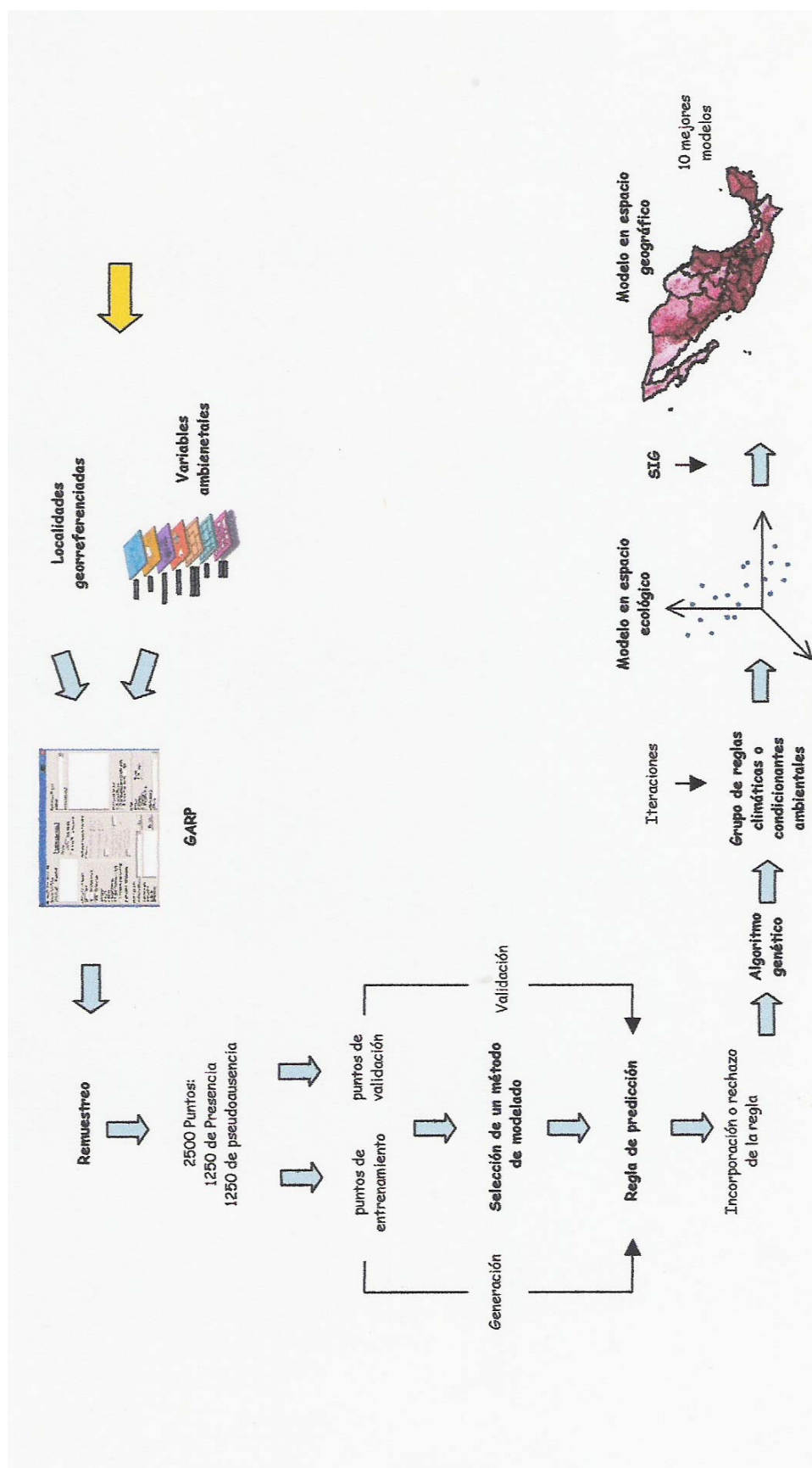


Fig. 3. Procedimiento desarrollado por GARP para la generación de los modelos de nicho ecológico (GARP = Genetic Algorithm for Rule-set Prediction).

6.2. ESCENARIO CLIMÁTICO ACTUAL

Los modelos del área de distribución potencial (ADP) actual se generaron utilizando los mapas digitales de las variables ambientales (Tabla 1) y las bases de datos de las localidades históricas de *Lepus callotis* (50 localidades) y de *Sylvilagus cunicularius* (62 localidades). En el caso de *S. cunicularius* se incluyeron en el modelado, además de las localidades históricas, 34 localidades de campo (Tabla 3) dando un total de 96 localidades, para tener una adecuada representación de la distribución potencial actual del conejo montés.

En el algoritmo GARP se generaron 100 modelos de nicho ecológico, tanto para *Lepus callotis* como para *Sylvilagus cunicularius* y se seleccionó a los diez mejores para cada una de las especies. A continuación, en el caso de la liebre fue necesario cortar en el SIG a los diez mejores modelos con un mapa de cuencas de México (CONABIO 2000), con la finalidad de disminuir la sobrepredicción del área de distribución potencial actual de la liebre torda (Fig. 4).

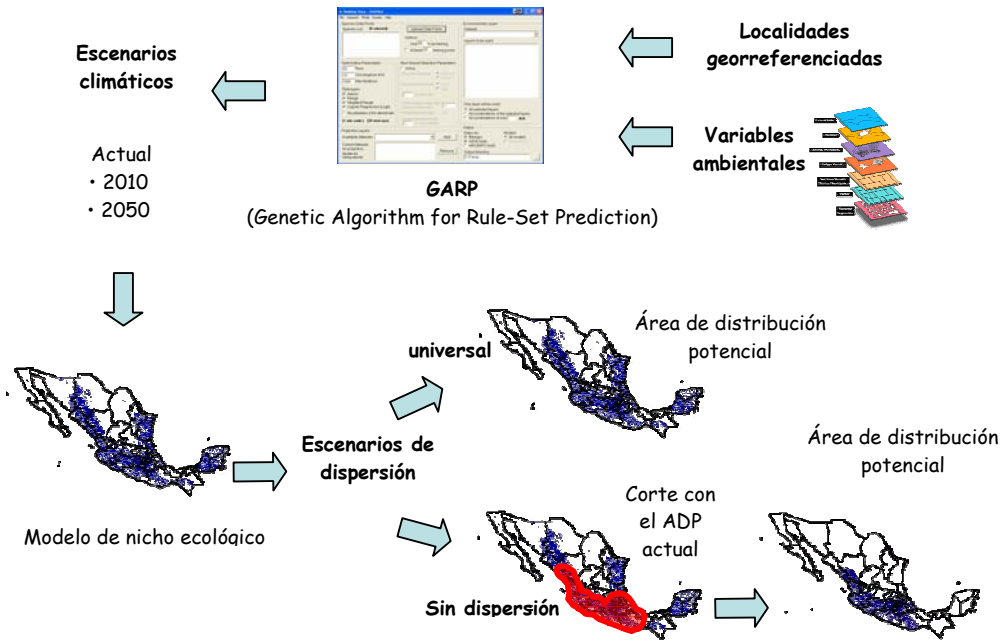


Fig. 4. Procedimiento para generar los modelos de distribución potencial de *Lepus callotis* y *Sylvilagus cunicularius*.

6.2.1. PODER PREDICTIVO DE LOS MODELOS

Los mapas del área de distribución potencial actual obtenidos a partir de los modelos de nicho ecológico producidos por GARP y un mapa digital de uso de suelo y vegetación del Inventario Forestal Nacional del año 2000 (SEMARNAP-INEGI-UNAM- 2001), fueron utilizados para definir los sitios de muestreo en campo, que en principio estuvieron dirigidos a sitios de colecta históricos y procurando que se cubrieran la mayor extensión del área de distribución de cada especie.

Los puntos de verificación de la presencia de las dos especies fueron obtenidos también mediante confirmaciones verbales de los habitantes y citas en documentos científicos (artículos y tesis).

6.2.1.1. Muestreo en campo de *Lepus callotis*

Se realizaron cinco salidas de campo durante el periodo comprendido entre septiembre de 2005 hasta agosto de 2006. Los estados visitados fueron: Chihuahua, Durango, Zacatecas, Aguascalientes, Jalisco, Michoacán, Guanajuato, Hidalgo, Tlaxcala y Estado de México (Tabla 2). En los lugares de muestreo se realizaron transectos de 10 km de largo y 70 m de ancho a cada lado del camino, utilizando una camioneta a una velocidad constante de 10 km/hora y alumbrando con faros de halógeno a cada lado del transecto, para confirmar la presencia de la liebre torda. En cada transecto se tomaron las coordenadas geográficas con un posicionador geográfico manual (GPS). Los recorridos se realizaron durante las noches y hasta la madrugada (Berdnarz y Cook 1984, Vargas 2000).

Los puntos de presencia de *Lepus callotis* fueron sobrepuestos en los modelos generados y comparados mediante una prueba de X^2 para determinar si los modelos los predecían más que lo esperado al azar.

6.2.1.2. Muestreo en campo de *Sylvilagus cunicularius*

Se realizaron cuatro salidas a diferentes localidades del centro del país durante el periodo comprendido entre julio de 2004 y febrero de 2005. Los estados visitados fueron: Jalisco, Puebla, Tlaxcala, Estado de México y el Distrito Federa. Se hicieron recorridos de día y a pie en transectos de 200 m de largo, en los cuales se colocó un cuadrante de 2m x 2m cada 10m,

buscando excretas para un registro indirecto de especie (Aranda 2000, Wemmer et al. 1996). Se tomaron las coordenadas geográficas de las localidades con un posicionador geográfico manual (GPS).

6.3. ESCENARIOS CLIMÁTICOS FUTUROS Y DE DISPERSIÓN

Para las proyecciones a los años futuros (años 2010 y 2050), se utilizaron los escenarios climáticos generados por el Canadian Centre for Climate Modelling (CCC A2 SRES), que fueron obtenidos del Intergovernmental Panel for Climate Change (<http://ipcc/ddc.cru.uea.ac.uk/>) (Tabla 1). Se utilizaron las bases de datos de las localidades históricas de *Lepus callotis* (50 localidades) y las localidades históricas y de campo de *Sylvilagus cunicularius* (96 localidades). Utilizando las capas climáticas futuras, las bases de datos y el algoritmo GARP, se generaron 100 modelos de nicho ecológico para cada especie, en los dos escenarios futuros y se seleccionaron de los mismos, los diez mejores para cada uno de los escenarios correspondientes a cada una de las especies.

Se establecieron dos escenarios de dispersión: el primero fue el de no dispersión, en el cual el supuesto es que la especie no puede distribuirse por fuera de sus límites actuales de distribución (Peterson et al. 2001). En el SIG, utilizando el área de distribución potencial actual de *Lepus callotis* y *Sylvilagus cunicularius*, se cortó a los diez mejores modelos de nicho ecológico de cada una de las especies, para simular un escenario donde las especies no tendrían posibilidades de dispersión que fueran más allá de los límites de su distribución actual. El segundo escenario fue el de dispersión universal, en donde se supone que la distribución de la especie no tendría restricciones en

cuanto a barreras geográficas o ecológicas (Peterson et al. 2001). En este escenario, los diez mejores modelos de nicho ecológico de las especies no fueron recortados y se les dejó tal cual son generadas por el algoritmo (Fig. 4).

Claramente, ambos escenarios son poco realistas, pero como no se contó con información sobre las posibilidades de dispersión de las especies, estos dos escenarios permitieron conocer los extremos potenciales del efecto del cambio climático sobre el ADP de *Lepus callotis* y *Sylvilagus cunicularius* (Peterson et al. 2001).

6.4. MODELOS DEL ÁREA DE DISTRIBUCIÓN POTENCIAL

En ArcView GIS 3.2 (ESRI, 1999), se procesaron los modelos de nicho ecológico producidos en GARP y con ellos se generaron los mapas que representan las áreas de distribución potencial (ADP) de las dos especies bajo los tres escenarios climáticos (actual, años 2010 y 2050) y los dos de dispersión (sin dispersión y dispersión universal). Para todos los mapas se tomó en cuenta el consenso con valores de 7 a 10 de los mejores modelos para la liebre torda y de 8 a 10 modelos en el caso del conejo montés; la elección de estos consensos se basó en que al evaluar el poder predictivo de los modelos de área de distribución potencial actual, estos valores de consenso mostraron que eran los adecuados para tener una buena representación de la distribución potencial de las especies y minimizar los errores de omisión y comisión.

6.4.1. Presencia Potencial de las Especies

En estos mapas se representaron las áreas donde se esperaba la presencia de las especies en alguno de los escenarios climáticos y de dispersión. Se elaboraron los mapas con el área de distribución potencial actual, del año 2010 y 2050 tanto de *Lepus callotis* como de *Sylvilagus cunicularius*. Se combinaron los tres escenarios climáticos de cada una de las especies para determinar las áreas de permanencia para la liebre y el conejo, es decir, las áreas donde se estima que cada una de estas especies se encuentran potencialmente presentes en el tiempo actual y se esperaba que permanezcan ante las condiciones climáticas esperadas para los años 2010 y 2050. A continuación, se representó la permanencia coincidente de ambas especies para los tres escenarios climáticos. En estas áreas se esperaba que ambas especies fueran simpátricas en el tiempo actual y que permanecieran ante las condiciones climáticas esperadas en los años 2010 y 2050.

Finalmente, se cuantificaron y compararon las modificaciones en el tamaño y la orientación de los desplazamientos de la distribución de ambas especies correspondientes a los tres escenarios climáticos y los dos de dispersión. Con el análisis e integración de los modelos de distribución actuales y futuros se obtuvo un panorama general de los posibles efectos del cambio climático en la distribución de *Lepus callotis* y *Sylvilagus cunicularius*.

7. RESULTADOS

7.1. ESCENARIO CLIMÁTICO ACTUAL

Lepus callotis

Se obtuvo un total de 50 localidades históricas para *L. callotis* y el modelo del área de distribución potencial actual generado con estas localidades fue similar a la propuesta por Hall (1981) (Fig. 1). Sin embargo, el modelo incluye áreas en el noreste de Chihuahua, suroeste de Durango, norte de San Luís Potosí y Veracruz en las cuales hasta el momento no se tienen reportes de la presencia de la especie (Fig. 5).

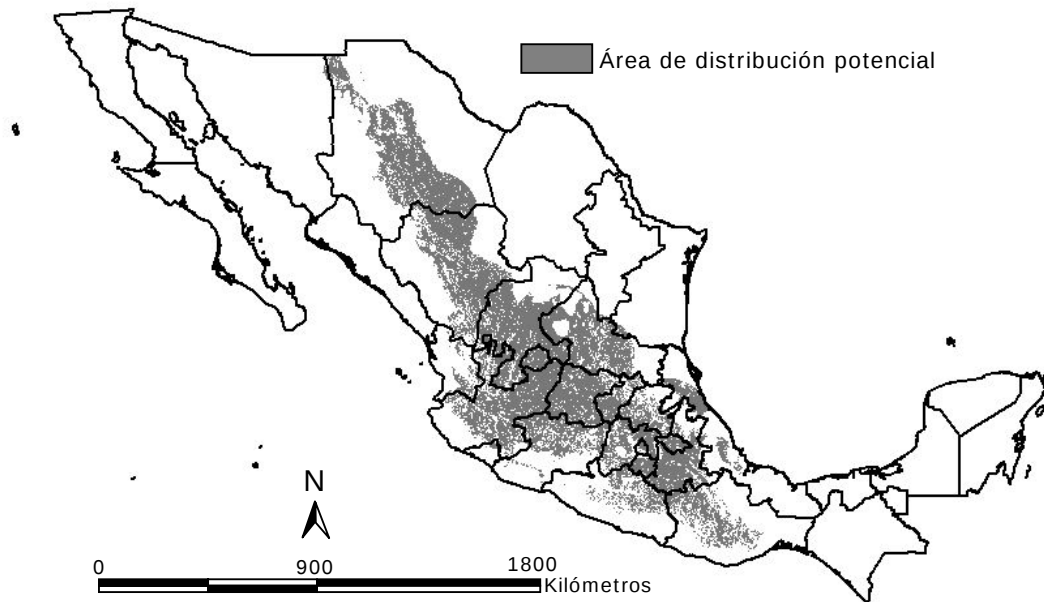


Fig. 5. Modelo de distribución del nicho ecológico de *Lepus callotis*, para el escenario climático actual.

Sylvilagus cunicularius

Se compilaron 62 localidades históricas de *S. cunicularius* a las cuales se adicionaron 34 más, producto del muestreo en campo. Esto para poder generar el área de distribución actual. El modelo resultante también presentó similitud con el propuesto por Hall (1981) (Fig. 1). Para esta especie se presentaron áreas de distribución potencial en el suroeste de Durango, norte de Jalisco y planicie costera de Veracruz, en donde no se tienen registros de la presencia de este lagomorfo (Fig. 6).

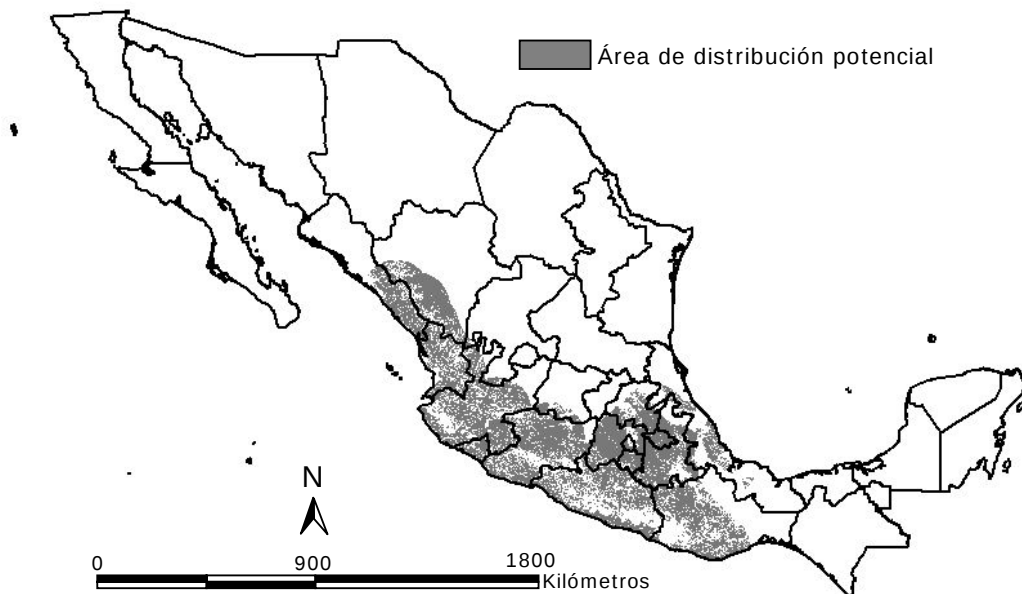


Fig. 6. Modelo de distribución del nicho ecológico de *Sylvilagus cunicularius*, para el escenario climático actual.

7.1.1. EVALUACIÓN DEL PODER PREDICTIVO DE LOS MODELOS

Lepus callotis

En 15 de las 20 localidades visitadas, se confirmó la presencia de esta especie (Tabla 2) (Fig. 7).

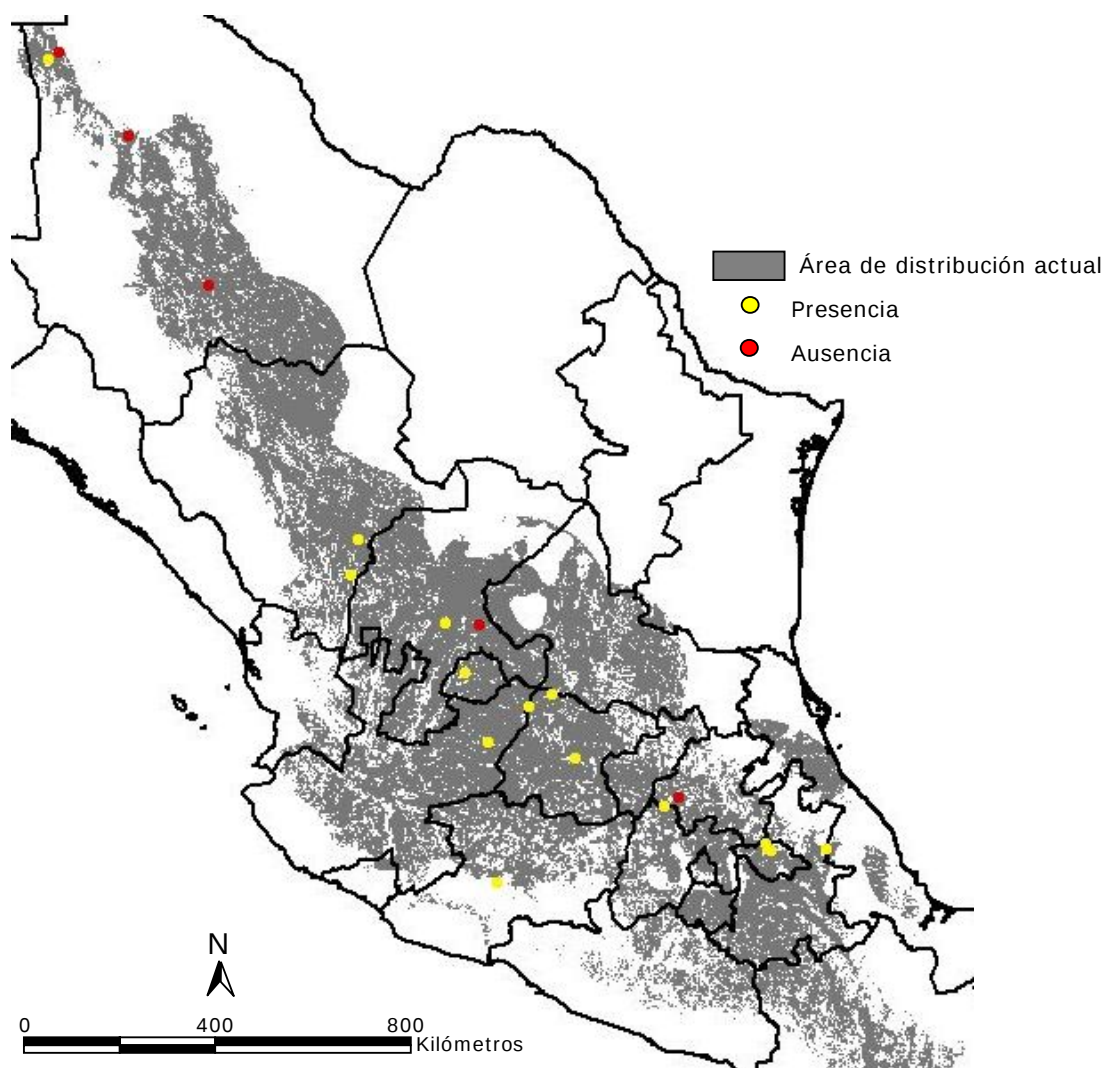


Fig. 7. Modelo de distribución del nicho ecológico de *Lepus callotis*, para el escenario climático actual y localidades de verificación.

TABLA 2. Localidades de muestreo para la verificación del modelo de distribución potencial actual de *Lepus callotis*.

NUM	FECHA	ESTADO	LOCALIDAD	LONGITUD	LATITUD	MUESTREO DE CAMPO
1	20-Ene-05	AGU	2 Km. S de Potrero de Los López, Mun. San Jose de Gracia.	-102.52553	22.06875	P
2	26-Mar-05	EDO.MÉX	2 km. NNO de Mataxhi, Mun. Jilotepec.	-99.68464	20.17240	P*
3	9-Sep-04	CHI	El Uno. 25 Km. SWW de Janos, Mun. Janos.	-108.44505	30.83197	P
4	22-Ago-05	CHI	10 Km. SW de Valerio. Mun. Valle de Zaragoza.	-106.16845	27.60833	A
5	23-Ago-05	CHI	12 km. NWW de Janos. Mun. Janos.	-108.31036	30.93145	A
6	26-Ago-05	CHI	Agua de Perez. 20 Km. SE de San Buenaventura. Mun. Buenaventura.	-107.31333	29.72442	A
7	18-Oct-04	DUR	Villa Unión. Mun. Poanas.	-104.04444	23.97472	P*
8	18-Ago-05	DUR	15.3 Km. SSW de San Miguel de la Michilia. Mun. Súchil.	-104.14260	23.47624	P
9	21-Ene-05	GTO	Los Toriles. Delante de Tinajas, Mun. Allende.	-100.95603	20.86589	P*
10	10-Sep-05	GTO	Santiago, Mun. San Felipe.	-101.28754	21.76770	P
11	12-Sep-05	HGO	Sabinilla, Mun. Huichapan.	-99.47603	20.29570	A
12	21-Ene-05	JAL	Huizache. 6.5 Km SE de Matánzas, Mun. Ojuelos de Jalisco.	-101.61216	21.59037	P
13	20-Oct-04	JAL	3 km. NO de San Carlos, Mun. San Julian.	-102.19156	21.08601	P*
14	22-Oct-04	MIC	0.5 Km. NNO de El Marquez, Mun. Mugica.	-102.07453	19.09887	P
15	08-Ene-99	TLA	1.8 Km. NE, San Antonio Zacatelco, Mun. Atlangatepec.	-98.16523	19.54753	P*
16	13-Sep-05	TLA	Atlangatepec, Mun. Atlangatepec.	-98.21830	19.58250	P*
17	14-Sep-05	TLA	Tlaxcala	-98.22972	19.64774	P*
18	2003	VER	4 km. SE de El Frijol Colorado. Mun. Perote.	-97.37600	19.56050	P*
19	18-Ene-05	ZAC	Mina de extracción San Francisco I. Madero, Mun. Jerez.	-102.79470	22.79365	P
20	19-Ene-05	ZAC	4.5 Km. NE de Trancoso, Mun. Guadalupe.	-102.32751	22.75543	A

A = Ausencia de la especie, P = Presencia de la especie, * = Registro en literatura, + = Comunicación de los lugareños

El análisis estadístico de los datos mediante una prueba de χ^2 confirmó que el número de presencias y ausencias de la especie no difirieron de manera significativa ($P = 0.0927$, $\alpha = 0.05$), de lo esperado por el azar. Sin embargo, tomando en cuenta la concordancia entre los puntos predichos por el modelo y los encontrados en el campo, el modelo de distribución actual potencial para *Lepus callotis* mostró 75% de poder predictivo.

Se confirmó la presencia de *Lepus callotis* en localidades principalmente del centro del país y de acuerdo a los pobladores de las comunidades visitadas, en el norte del país, la presencia de *L. callotis* está modificando su distribución hacia las estribaciones de la Sierra Madre Occidental (Fig. 7).

Sylvilagus cunicularius

El trabajo de campo mostró que el modelo de distribución potencial actual de *S. cunicularius* generado a partir de localidades históricas no describía satisfactoriamente la distribución de este lagomorfo. De 39 localidades visitadas en cuatro diferentes salidas al centro del país, en 21 se confirmó la presencia del conejo montés (Tabla 3). Sin embargo, 16 de estas 21 localidades de presencia no estaban representadas dentro del consenso con valores de 8 a 10, del modelo preliminar de distribución potencial. Con el fin de proponer una mejor representación de la distribución actual de esta especie, se incluyeron los puntos de campo (34 localidades) dentro de la base de datos de localidades históricas para generar un modelo final donde la representación del área de distribución potencial de *S. cunicularius* se apegara a su situación actual (Fig. 8).

TABLA 3. Localidades de muestreo para la verificación del modelo de distribución potencial actual de *Sylvilagus cunicularius*.

NUM	FECHA	ESTADO	LOCALIDAD	LONGITUD	LATITUD	MUESTREO DE CAMPO
1	01-May-97	COL	On the western slopes of the Volcano of Colima	-103.6856	19.4902	P*
2	14-Jul-04	D.F.	Entre el derrame del volcán Pelado y el volcán Oyameyo	-99.1961	19.1635	P
3	14-Jul-04	D.F.	Planicie despues de descender del crater del Volcán Pelado	-99.2209	19.1536	P
4	13-Ago-04	D.F.	Volcán Tlaloc	-98.9674	19.1120	A
5	13-Ago-04	D.F.	Volcán Tlaloc	-98.9715	19.1125	A
6	13-Ago-04	D.F.	Volcán Tlaloc	-98.9800	19.1172	A
7	13-Ago-04	D.F.	Volcán Tlaloc	-98.9863	19.1136	A
8	13-Ago-04	D.F.	Volcán Tlaloc	-98.9908	19.1100	A
9	Feb-05	D.F.	Faldas del volcán Pelado	-99.1937	19.1229	P
10	Feb-05	D.F.	Faldas del volcán Pelado	-99.2122	19.1170	P
11	Feb-05	D.F.	Alrededores del volcán Pelado	-99.2286	19.1167	P
12	Feb-05	D.F.	Alrededores del volcán Pelado	-99.2401	19.1065	P
13	Feb-05	D.F.	Alrededores del volcán Pelado	-99.2371	19.1145	P
14	Feb-05	D.F.	A un costado de Rancho Ecológico La Cima	-99.1904	19.1076	P
15	Feb-05	D.F.	La Cima	-99.1931	19.1145	P
16	27-Ene-05	EDO.MÉX	2 k de Río Frío, carretera libre a México.	-98.6947	19.3436	P
17	27-Ene-05	EDO.MÉX	2 k de Río Frío, carretera libre a México.	-98.6950	19.3439	P
18	Feb-05	EDO.MÉX	Zona Iztaccíhuatl	-98.6454	19.1377	P
19	Feb-05	EDO.MÉX	Zona Iztaccíhuatl	-98.5669	19.0931	P
20	Feb-05	EDO.MÉX	Zona Iztaccíhuatl	-98.5717	19.0931	P
21	Feb-05	EDO.MÉX	Calpan hacia Buenavista	-98.5615	19.1332	P
22	Feb-05	EDO.MÉX	Zona Iztaccíhuatl	-98.6516	19.0831	P
23	Feb-05	EDO.MÉX	Zona Iztaccíhuatl	-98.6787	19.0975	P
24	Feb-05	EDO.MÉX	Zona Iztaccíhuatl	-98.7256	19.0719	P

A = Ausencia de la especie, P = Presencia de la especie, * = Registro en literatura

TABLA 3. (Continuación) Localidades de muestreo para la verificación del modelo de distribución potencial actual de *Sylvilagus cunicularius*.

NUM	FECHA	ESTADO	LOCALIDAD	LONGITUD	LATITUD	MUESTREO DE CAMPO
25	Feb-05	EDO. MÉX	Zona Iztaccíhuatl	-98.7173	19.0925	P
26	Feb-05	EDO. MÉX	Zona Iztaccíhuatl	-98.6885	19.2176	P
27	Feb-05	EDO. MÉX	Zona Iztaccíhuatl	-98.6698	19.2451	P
28	01-Mar-05	JAL	Estación de Biología Chamela	-105.0500	19.5000	P
29	Feb-05	PUE	Zona Iztaccíhuatl	-98.5840	19.0797	P
30	Feb-05	PUE	Zona Iztaccíhuatl	-98.6139	19.0898	P
31	Feb-05	PUE	Zona Iztaccíhuatl	-98.6214	19.0882	P
32	Feb-05	PUE	Zona Iztaccíhuatl	-98.6333	19.0985	P
33	Oct-98	GUE	Omiltemi, Mun. Chilpancingo	-99.6867	17.5543	P*
34	25-Ene-05	TLA	1.8 km NOE de Acopinalco del Peñón, Mun. Tlaxco	-98.1820	19.6660	P
35	25-Ene-05	TLA	2 km NOE de Acopinalco del Peñón, Mun. Tlaxco	-98.1806	19.6672	P
36	25-Ene-05	TLA	2.5 km NOE de Acopinalco del Peñón, Mun. Tlaxco	-98.1786	19.6667	P
37	26-Ene-05	TLA	3 km O de la Ranchería Altamira Guadalupe, Mun. Huamantla	-98.0109	19.2838	P
38	26-Ene-05	TLA	3 km O de la Ranchería Altamira Guadalupe, Mun. Huamantla	-98.0469	19.2832	P
39	26-Ene-05	TLA	3 km O de la Ranchería Altamira Guadalupe, Mun. Huamantla	-98.1002	19.2490	P

A = Ausencia de la especie, P = Presencia de la especie, * = Registro en literatura

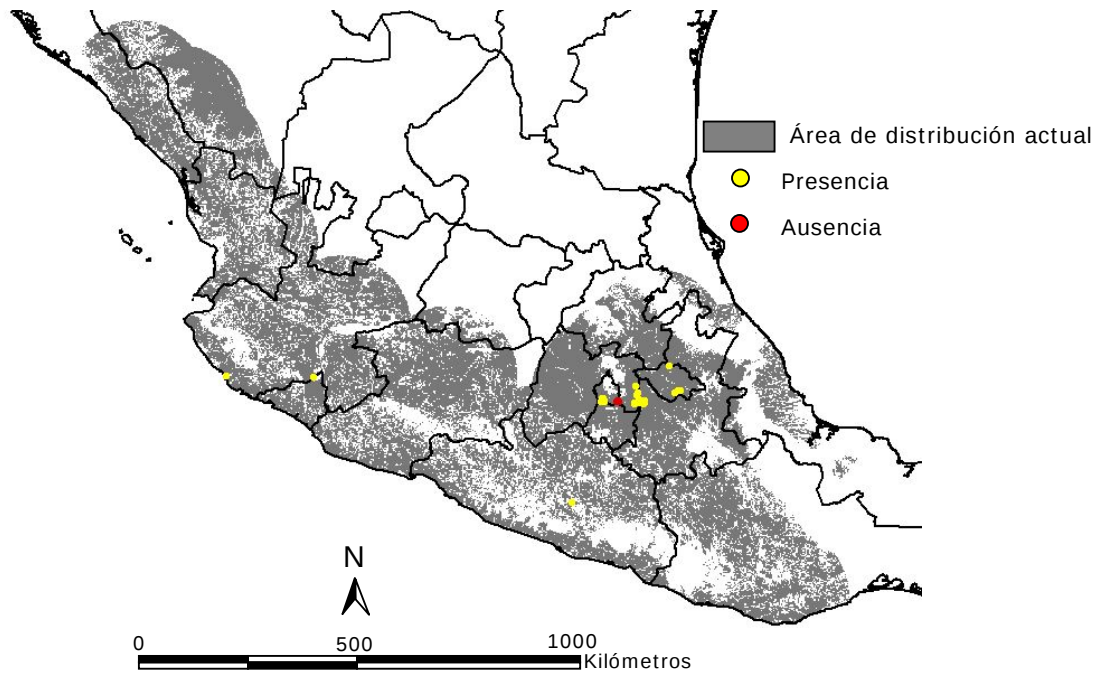


Fig. 8. Modelo de distribución del nicho ecológico de *Sylvilagus cunicularius*, para el escenario climático actual y localidades de verificación.

7.2. ESCENARIOS CLIMÁTICOS FUTUROS Y DE DISPERSIÓN

Lepus callotis

Escenarios climáticos sin dispersión

Bajo el escenario de no dispersión, el área de distribución potencial (ADP) actual de *L. callotis* presentó una reducción del 38.06% ante los cambios climáticos esperados para los próximos 50 años. Estas reducciones están localizadas principalmente en la zona norte y centro norte de México (Fig. 9a). Para los dos escenarios futuros (años 2010 y 2050) se observó una amplia contracción del ADP actual en los estados de Chihuahua, Durango y Zacatecas, además de áreas de la Cuenca del Balsas, Valles de Oaxaca, norte y centro del estado de Veracruz (color rojo). En tanto que el área del centro de

Zacatecas y oeste de San Luis Potosí, presentaron condiciones favorables para la presencia potencial de la liebre torda, en el escenario actual y del año 2010; sin embargo, no presentaría condiciones favorables para la presencia potencial de la liebre hacia el año 2050 (color verde). Se observó que áreas que comprenden desde el noroeste del estado de Chihuahua hasta el oeste de Zacatecas, recuperarían las condiciones favorables que permitirían la presencia potencial de la liebre hacia el año 2050 (color azul) (Fig. 9a).

Por otro lado, con las condiciones climáticas del año 2010 se esperaría la reducción del área de distribución potencial actual (351,475 km²) de la liebre torda en un 44.63%, mientras que para el año 2050 la reducción sería del 38.06%. El área de distribución potencial de *L. callotis* que permanecería bajo los tres escenarios climáticos representaría el 41.69% del ADP actual en México (color amarillo) (Fig. 9a).

Escenarios climáticos con dispersión universal

El escenario de dispersión universal evidenció un aumento del 34.15% en el área de distribución potencial actual de *Lepus callotis*, para los próximos 50 años (Fig. 9b). Las áreas potencialmente habitables se ubican principalmente en planicies hacia el noroeste y noreste del país (color aguamarina, verde claro y rosa). En el noroeste existen pequeñas áreas en la Península de Baja California Norte, particularmente en las estribaciones de la Sierra de Juárez y Sierra de San Pedro Mártir; mientras que en Baja California Sur, se ubicarían en las planicies de la Sierra de La Laguna, de Santa Clara y San Lázaro. Otras áreas favorables comprenden las planicies de Sonora y Sinaloa del lado de barlovento de la Sierra Madre Occidental. En el noreste del

país las áreas potencialmente habitables serían en el norte y centro de Tamaulipas, centro y noreste de Nuevo León y noreste de Coahuila. Hacia el sureste del país se presentaron áreas potenciales en las planicies de barlovento de la Sierra de los Altos de Chiapas. Se observaron áreas potenciales a partir del año 2010 y que permanecerían hacia el año 2050 (color verde claro), en tanto que, otras áreas presentarían condiciones favorables para la presencia potencial de *L. callotis* hasta el año de 2050 (color aguamarina) (Fig. 9b).

En Baja California Sur, sur de Sonora, norte de Sinaloa, norte y centro de Tamaulipas, noreste de Nuevo León, noroeste de San Luis Potosí y centro de Chiapas, se pueden observar áreas que en el año 2010 tendrían condiciones favorables para la presencia potencial de la liebre torda las cuales dejarían de ser favorables en el año de 2050 (color rosa). Con este escenario de dispersión universal, se observó la misma contracción en el área de distribución potencial actual de *L. callotis* que en el escenario de no dispersión y que fue descrita con anterioridad (Fig. 9b).

Con las condiciones climáticas del año 2010 se esperaría un aumento del 10.09% en el área de distribución potencial actual de la liebre torda (351,475 km²), mientras que para el año 2050 el aumento sería del 34.15%. El área de distribución potencial de *Lepus callotis* en México que permanecería bajo los tres escenarios climáticos sería un área de 146,540 km², la cual representa 41.69% del área de distribución potencial actual (color amarillo) (Fig. 9b).

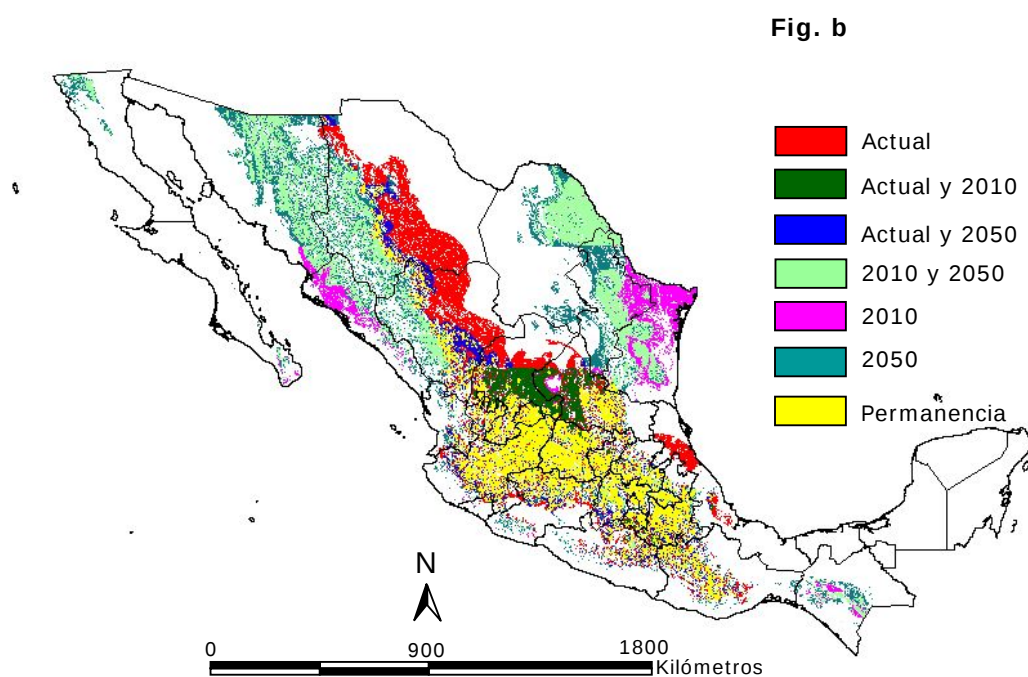
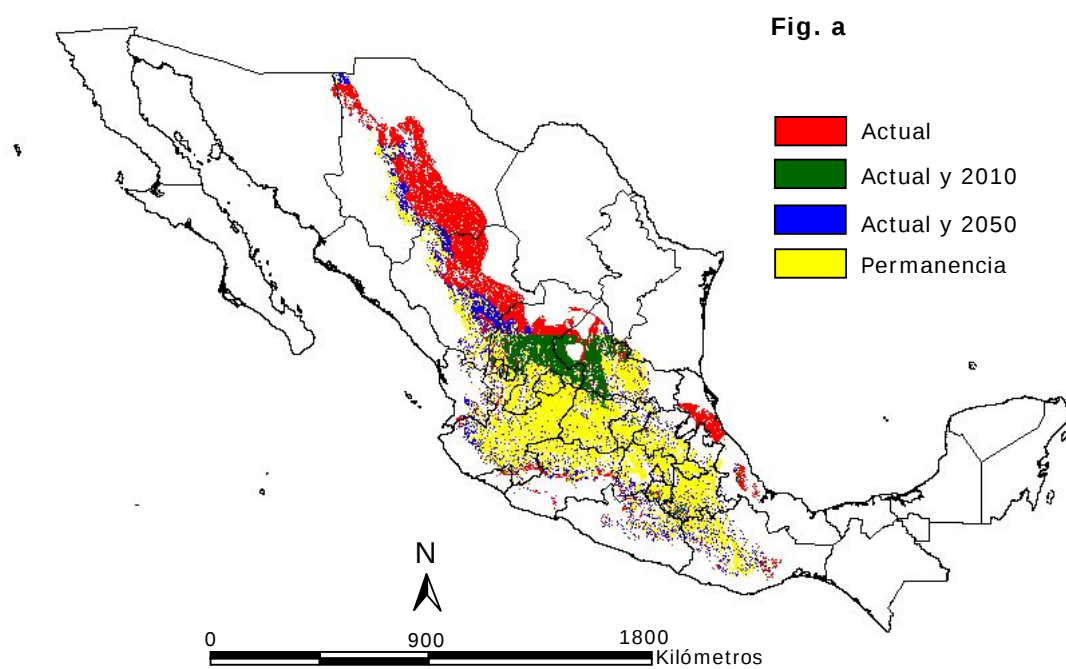


Fig. 9. Modelos de distribución del nicho ecológico de *Lepus callotis* para los escenarios climáticos actual, del año 2010 y 2050, sin dispersión (a) y con dispersión universal (b).

Sylvilagus cunicularius

Escenarios climáticos sin dispersión

En el escenario sin dispersión, el área de distribución potencial (ADP) actual de *Sylvilagus cunicularius* no mostró grandes cambios en forma y magnitud. La contracción del ADP esperada para los escenarios futuros (años 2010 y 2050) representaría 18.36% del ADP actual. Las áreas que carecerían de condiciones favorables para la presencia potencial del conejo montés en alguno de los escenarios futuros se encuentran en los estados de Sinaloa, Nayarit, Jalisco, Michoacán, Hidalgo, Puebla y Veracruz, y la Planicie Costera del Pacífico (Fig. 10a).

Áreas de Sinaloa, Nayarit, cuenca del Balsas, centro de Puebla y la Planicie Costera del Pacífico en los estados de Guerrero y Oaxaca, sólo presentarían condiciones favorables para la presencia potencial de *S. cunicularius* en el escenario actual (color rojo). Para el año 2010 las áreas desfavorables se localizarían en la Planicie Costera del Pacífico desde el sur de Sinaloa hasta las Bahías de Huatulco, en Oaxaca, en Nayarit, norte y este de Jalisco, depresión del Balsas, noroeste de Guerrero y sur de Hidalgo (color verde oscuro). Para el año 2050 áreas del noroeste de Nayarit recuperarían las condiciones favorables que permitirían la presencia potencial de las poblaciones de *S. cunicularius* (color azul oscuro) (Fig. 10a).

El área de distribución potencial actual del conejo montés (243,100 km²) presentaría una reducción de 12.77% en el año 2010 y de 18.36% en el año de 2050. El área de distribución potencial de *S. cunicularius* que

permanecería bajo los tres escenarios climáticos representaría 77.65% del ADP actual (color amarillo) (Fig. 10a).

Escenarios climáticos con dispersión universal

Ante un escenario de dispersión universal, el área de distribución potencial actual de *Sylvilagus cunicularius* mostró una expansión del 110.09% para los próximos 50 años. Las áreas potencialmente habitables ocurrirían hacia el noroeste, noreste y sureste del país, principalmente (Fig. 10b). Las áreas favorables para el año 2010 que permanecerían hasta el año 2050 (color verde claro), se presentaron hacia el noroeste: en la Península de Baja California Norte en las Sierra de Juárez y de San Pedro Mártir; en Baja California Sur en la Sierra La Laguna y San Lázaro. En el norte: en la Sierra Madre Occidental (Chihuahua y Durango). En la zona centro: en el sur de Zacatecas, noreste de Jalisco, centro de Guanajuato, noreste de Michoacán, norte de Querétaro, centro y este de San Luis Potosí. Hacia el noreste, en la mayor parte del estado de Tamaulipas, centro y noreste de Nuevo León. En el sureste del país: en el norte de Veracruz, Istmo de Tehuantepec; oeste de Chiapas y la Península de Yucatán (Fig. 10b).

Algunas áreas en la Península de Baja California, oeste y sur de Zacatecas, oeste de Aguascalientes y centro de San Luis Potosí, serán favorables bajo el escenario del año 2010, sin embargo, se convertirán en áreas desfavorables para el año de 2050 (color rosa). En el escenario del año 2050 se observaron áreas potencialmente habitables en el norte de Sonora, centro, norte y este de Nuevo León y norte de Tamaulipas. En el centro del país, en el suroeste de Jalisco y sur de Hidalgo; y en el suroeste se presentarían áreas favorables en el oeste de Campeche (color aguamarina) (Fig. 10b).

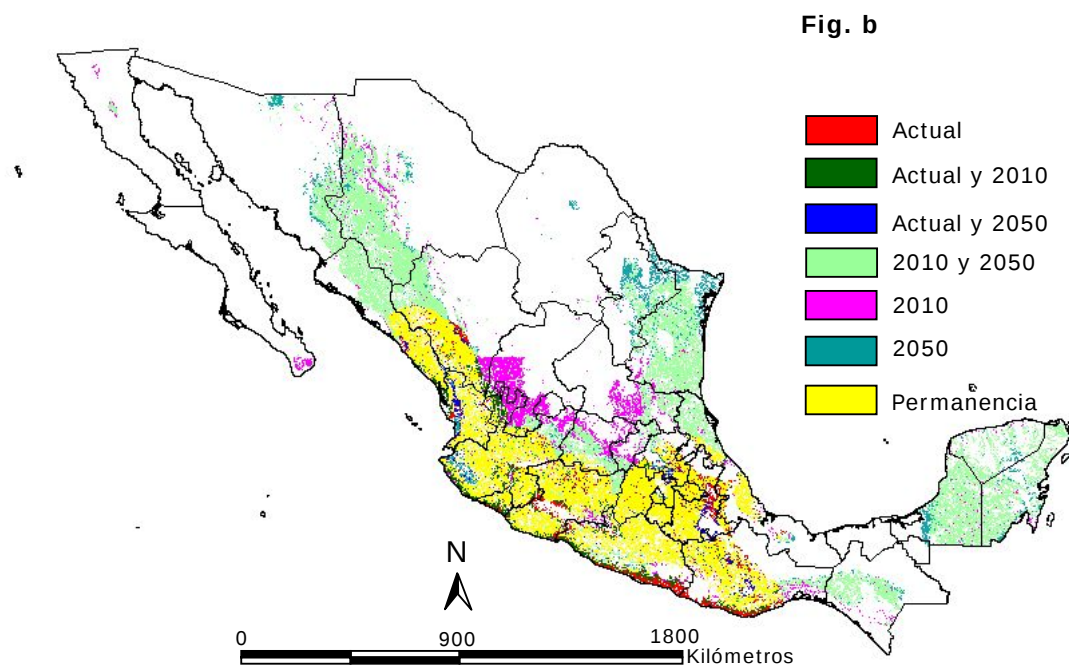
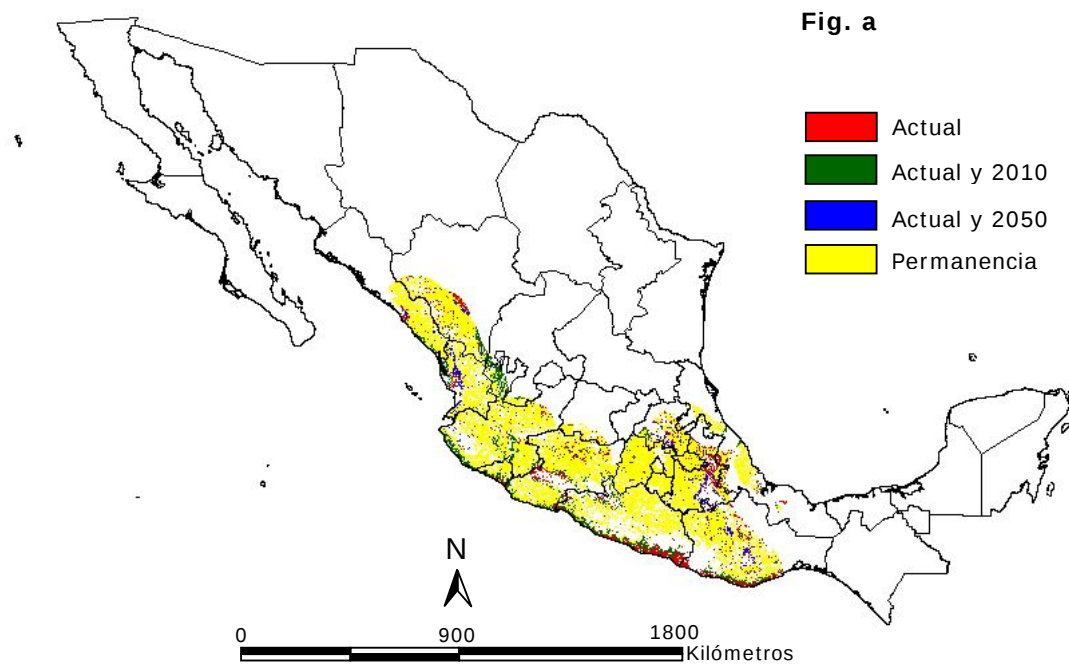


Fig. 10. Modelos de distribución del nicho ecológico de *Sylvilagus cunicularius* para los escenarios climáticos actual, del año 2010 y 2050, sin dispersión (a) y con dispersión universal (b).

Con las condiciones climáticas del año 2010 se esperaría un aumento del 99.82% en el área de distribución potencial actual del conejo montés (243,100 km²), mientras que para el año 2050 el aumento sería del 87.23%. El área de distribución potencial de *S. cunicularius* en México que permanecería bajo los tres escenarios climáticos sería de 188,772 km², la cual representa el 77.65% del área de distribución potencial actual (color amarillo) (Fig. 10b).

7.3. COMPARACIÓN DE LOS MODELOS DE DISTRIBUCIÓN POTENCIAL

Las proyecciones futuras de la distribución potencial tanto de *Lepus callotis* como de *Sylvilagus cunicularius* presentaron reducciones en magnitud, esto sería en el caso de no existir posibilidades de dispersión. Esta reducción sería más notoria en el caso de la liebre, ya que del área potencial de distribución actual (351,475 km²) sólo permanecería el 55.36% en el año de 2010 y el 61.93% en 2050. En el caso del conejo montés las reducciones serían menores, ya que permanecería el 87.22% en el año 2010 y el 81.63% en el año 2050 de la distribución potencial actual (243,100 km²) (Fig. 11).

En el escenario de dispersión universal se observó una expansión del área de distribución potencial de ambas especies para los próximos 50 años. Con este escenario *S. cunicularius* se vería más favorecido con las nuevas condiciones climáticas ya que el área potencial de su distribución aumentaría en 99.82% en el año 2010 y un 87.23% en el año 2050. En tanto que, para *L. callotis*, el aumento del área potencial de distribución es más discreto, ya que para el año 2010 sería del 10.09% y para el año 2050 del 34.15% (Fig. 11).

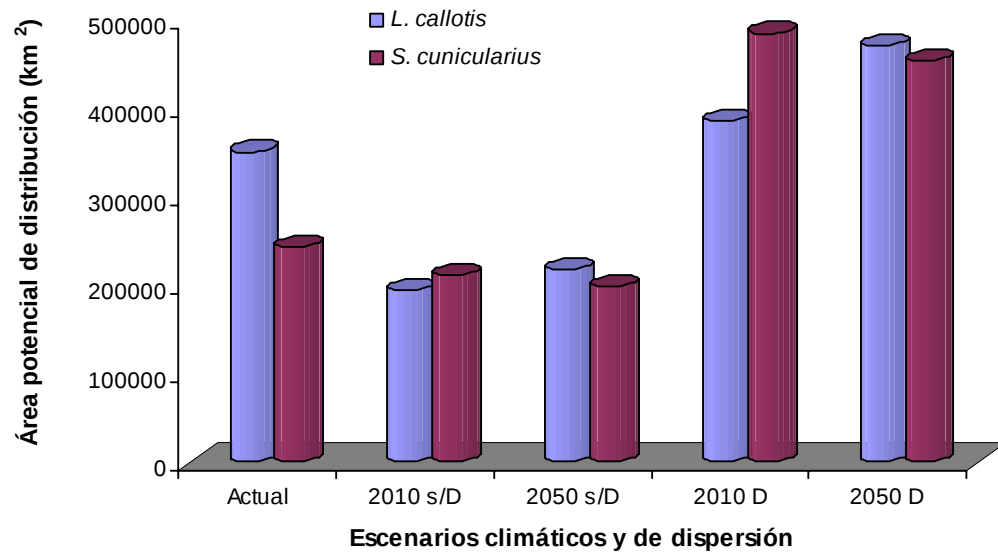


Fig. 11. Área potencial de distribución (km²) de las dos especies en los diferentes escenarios climáticos y de dispersión (s/D= sin dispersión, D = dispersión universal).

Las áreas potencialmente habitables esperadas para los próximos 50 años fueron mayores para *Sylvilagus cunicularius* en comparación con *Lepus callotis*, al representar 127.35% y 92.11% de su respectiva ADP actual.

En cuanto a la permanencia de las condiciones favorables para la presencia potencial de la liebre torda y el conejo montés ante los cambios climáticos esperados dentro de los próximos 50 años, se observó que la especie más perjudicada sería *L. callotis*, al permanecer el 41.69% (146,540 km²) del ADP actual, en comparación con la permanencia del 77.65% (276,819 km²) del ADP actual de *S. cunicularius* (Fig. 12). Por último, se encontró que las áreas donde se esperaría la permanencia de condiciones favorables para la presencia potencial simpátrica de ambas especies, ante los cambios climáticos esperados para el año 2050, serían principalmente al centro del país, a lo largo del Eje Neovolcánico Transversal, en un área de 58,586 km² que representa el 55.05% del ADP simpátrica actual (Fig. 13).

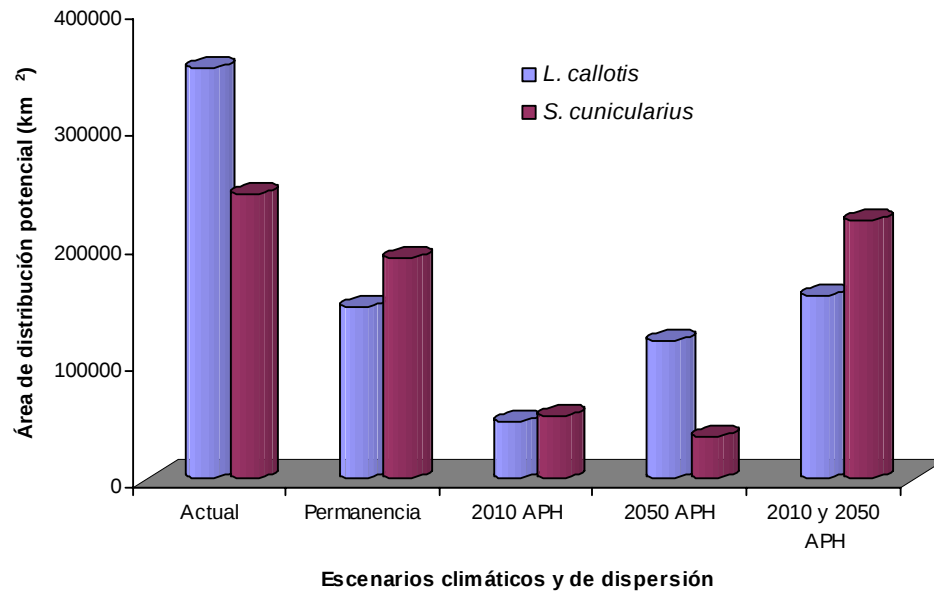


Fig. 12. Áreas de distribución potencial actual, de permanencia y potencialmente habitables (APH), de las dos especies en los dos escenarios climáticos futuros con dispersión universal.

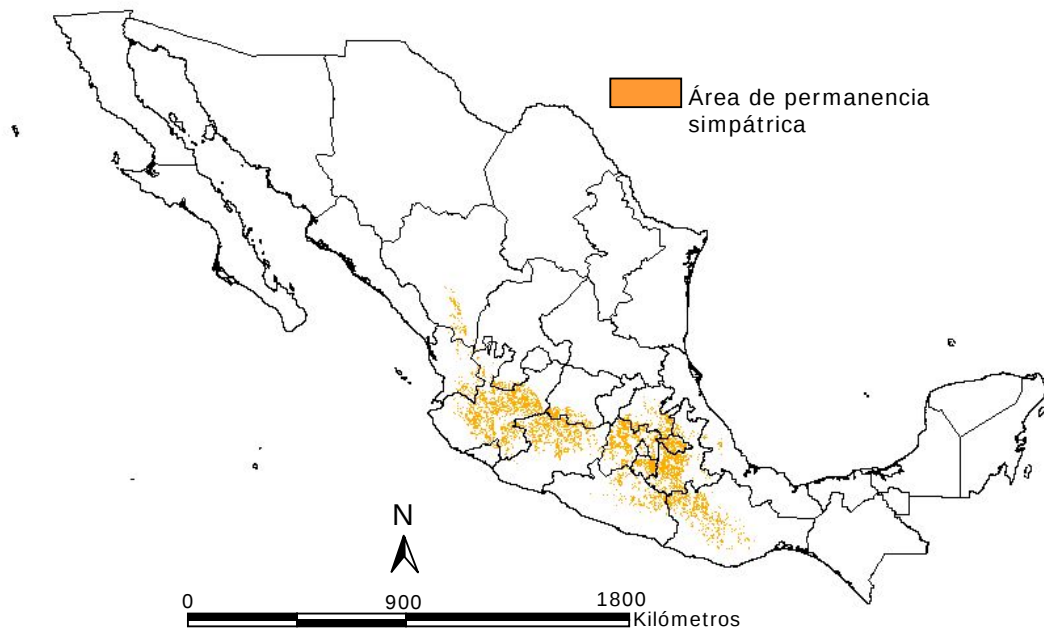


Fig. 13. Áreas de permanencia simpátrica de *Lepus callotis* y *Sylvilagus cunicularius* bajo los tres escenarios climáticos.

8. DISCUSIÓN

Los modelos del área de distribución potencial actual para *Lepus callotis* y *Sylvilagus cunicularius* tienen coincidencias con la propuesta de Hall (1981), sin embargo, el modelado con el uso del programa GARP muestra de manera más detalla la distribución potencial de ambas especies ya que considera solamente las áreas que tienen semejanza con las condiciones ecológicas de las áreas de registro en donde se ha encontrado a las especies (Fig. 5 y 6). La propuesta de Hall (1981) tiene el inconveniente de representar áreas de distribución continua para las especies sin considerar que la distribución de los organismos está condicionada por factores climáticos, físicos, biológicos e históricos, y que la presencia de una especie es el resultado de una condición ecológica presente y de un proceso histórico pasado (Vargas 1993, Brown 1995, Gaston 2003, Pearson y Dawson 2003, Soberón y Peterson 2005). La heterogeneidad y temporalidad con la cual se presentan los factores bióticos y abióticos en el espacio geográfico propicia que la distribución de los organismos no sea continua y que de manera natural se tengan áreas donde aunque se cumpla con todos los requerimientos que pudiera necesitar una especie en particular, ésta no esté presente (Peterson et al. 1999, Anderson et al. 2002, Soberón y Peterson 2005).

Las áreas de distribución potencial tanto de la liebre torda como del conejo montés generadas con GARP incluyen áreas en las cuales hasta el momento no se tienen reportes de la presencia de estas especies. Esto puede deberse a que uno de los inconvenientes de GARP es el llamado error de comisión, que origina la sobrepredicción de la presencia de las especies; es decir, la generación de áreas que tienen las mismas características ecológicas

que las áreas donde reside la especie pero en las cuales no está presente (Anderson et al. 2003). El error de comisión puede deberse a diferentes factores: (1) el algoritmo efectivamente produjo un modelo de nicho que considera combinaciones ambientales que la especie no ocupa (Pearson et al. 2006). (2) que el modelo de nicho sea adecuado, pero la ausencia de la especie obedece a factores ajenos al contexto abiótico, como las interacciones bióticas o simplemente que históricamente la especie nunca ha habitado ese sitio por cuestiones de historia de vida y dispersión (Soberón y Peterson 2005). Ambas situaciones son factibles y sin un estudio comparativo con diversos algoritmos es difícil separar las causas de la sobrepredicción (Elith et al. 2006).

Para disminuir la sobrepredicción que genera el programa se implementaron las áreas de corte tanto en las capas climáticas de las variables ambientales como de los modelos de nicho ecológico de ambas especies. Diferentes autores validan la utilización de áreas de recorte con el propósito de mejorar los modelos de distribución potencial de las especies al disminuir las áreas de sobrepredicción (Sánchez-Cordero y Martínez-Meyer 2000, Peterson et al. 2001, Anderson et al. 2002, Navarro et al. 2003, Anderson y Martínez-Meyer 2004, Romero-Palacios 2004).

Otro tipo de error en el modelado de las distribuciones de especies es el error de omisión, que se produce cuando el modelo predice la ausencia de la especie en una localidad cuando efectivamente se tiene un registro de ésta (Anderson et al. 2003). Los errores de omisión también pueden deberse a fallas del algoritmo, pero más comúnmente se deben a sesgos en los datos de registro que se usan para generar los modelos (Sánchez-Cordero et al. 2001, Navarro et al. 2003).

Este fue el caso para *Sylvilagus cunicularius*, en el que de 38 localidades de campo donde se confirmó su presencia, 15 de éstas no estaban incluidas en el modelo preliminar de distribución potencial. Por ejemplo, en la base de datos de localidades históricas de esta especie, la localidad con mayor altitud es de 3,500 msnm, con lo cual, el modelo preliminar excluía áreas con altitudes mayores. En el campo se confirmó la presencia de este conejo en localidades ubicadas a una altitud de más de 4,000 msnm. Existe la posibilidad de que las poblaciones de *S. cunicularius* ya habitaran en áreas con altitudes mayores a los 3,500 msnm, pero la falta de un muestreo dirigido no había mostrado la presencia del conejo montés a mayor altitud. Chapman y Ceballos (1990) mencionan que esta especie ocurre desde el nivel del mar hasta los 4,300 msnm, sin embargo al consultar las fuentes citadas por estos mismos autores (Leopold 1959, Armstrong y Jones 1971, Ceballos y Galindo 1984) no se encontró la mención de la especie a una altitud mayor a los 3,500 msnm. Sin embargo, no puede descartarse la posibilidad de que las poblaciones del conejo montés ya estén colonizando áreas de mayor altitud en respuesta a los cambios ambientales producidos por el cambio climático, como predicen los modelos hacia el futuro generados en este estudio. Con la finalidad de mejorar el modelo de distribución potencial de este lagomorfo, se incluyeron las localidades de campo a la base de datos de localidades históricas, para generar nuevos modelos de nicho ecológico. El resultado fue un modelo final del área de distribución potencial más acorde con la distribución conocida del conejo montés (Fig. 6 y 8).

En cuanto a los modelos del área de distribución potencial (ADP) futura, el escenario sin dispersión es más conservador al restringir el movimiento de las poblaciones más allá del límite marcado por el ADP actual de las especies

(Peterson et al. 2001). Con este escenario se esperarían importantes reducciones en el ADP futura de las especies, siendo éstas más severas hacia el norte del país. Al parecer, el mantenimiento de las poblaciones de la subespecie *Lepus callotis galliardi* se verían reducidas debido a la futura disminución de su ADP y el movimiento de sus poblaciones hacia las estribaciones de la Sierra Madre Occidental. Parte de este comportamiento ya se observó durante los recorridos de campo, en los cuales al parecer se está presentando un movimiento de la distribución de esta subespecie hacia pastizales más cercanos a esta Sierra.

En general, las modificaciones de la distribución geográfica esperada para la liebre torda son más severas en comparación con el conejo montés. La distribución del conejo no se ve muy reducida, salvo por las áreas a lo largo de la vertiente del Pacífico, que perderían las condiciones favorables para esta especie en los próximos 50 años. Esta pérdida de hábitat posiblemente afectaría a las poblaciones de la subespecie *Sylvilagus cunicularius pacificus* que viven en estas áreas, no obstante, se carece de datos que permitan especular sobre la posibilidad de adaptación a ambientes más calientes y secos.

Con respecto a los escenarios futuros con dispersión universal, existen áreas que resultan muy improbables para la presencia potencial de ambas especies debido a la enorme distancia respecto a la distribución actual y la presencia de barreras geográficas (Toledo 1982, Halffter 1987, Flores-Villela 1993, Campbell 1999, Peterson et al. 1999, Wuethrich 1999, Morrone y Márquez 2001), siendo más probable que los organismos habiten áreas contiguas que presenten condiciones favorables para su establecimiento (Peterson et al. 2001). Siguiendo con este planteamiento, no sería posible que

Lepus callotis habite las áreas que se encuentran en Chiapas, ya que el Istmo de Tehuantepec representa una barrera geográfica, que no cuenta con las condiciones ambientales apropiadas para el establecimiento de poblaciones de la liebre torda, lo cual se puede observar en los mapas de distribución potencial (Fig. 10 y 12). Para *Sylvilagus cunicularius* tenemos un comportamiento parecido, las ADPs de la Península de Baja California están separadas por áreas que no cuentan con el nicho ecológico propicio para la especie, con lo cual la posible presencia a futuro no sería viable (Fig. 14 y 16).

La interacción con otras especies es un aspecto que escapa del poder de modelado de nicho. Las posibilidades de dispersión de estas especies estarían reguladas no sólo por las limitantes climáticas y geográficas sino también por el componente biótico (Peterson et al. 1999, Anderson et al. 2003, Soberón y Peterson 2005). En los modelos se observaron áreas potencialmente habitables para *Lepus callotis* que son ocupadas actualmente por otras especies de lepóridos; por ejemplo, las planicies de Sinaloa y Sonora aparecen como áreas viables para *L. callotis*, y son áreas que en la actualidad están siendo ocupadas por *Lepus alleni* (liebre antílope) y *Lepus californicus*; bajo el supuesto de que la especie *L. callotis* fuera capaz de encontrar una ruta que le permitiera acceder a estas planicies ubicadas del otro lado de la Sierra Madre Occidental, compartiría la misma área de distribución con estas dos especies. Se ha observado que las especies cercanamente emparentadas también tienen nichos ecológicos similares (Peterson et al. 2001). *L. callotis* está cercanamente emparentada con *Lepus flavigularis* (liebre tehuana) y *L. alleni* (Cervantes et al. 2002). Es posible el establecimiento de una interacción negativa entre *L. callotis* y *L. alleni* en el caso de que compartan áreas de distribución. La liebre torda está actualmente en simpatría con *L. californicus*

en una amplia área de su distribución y tiende a ocupar diferentes hábitat (Hall 1981, Best y Travis 1993). Sin embargo, la predominancia de una u otra en un lugar en particular está influenciada más por el cambio de uso de suelo, que por cualquier otro factor; *L. californicus* se ve más favorecida por la deforestación y el sobrepastoreo (Baker y Green 1962, Conway 1976, Berdnarz y Cook 1984, Matson y Baker 1986, Findley 1987, Best y Travis 1993, Villa y Cervantes 2003).

Sylvilagus cunicularius comparte actualmente su área de distribución con otras especies de lepóridos del género *Sylvilagus*, *Romerolagus* y *Lepus*: *S. auduboni*, *S. brasiliensis*, *S. floridanus*, *S. insonus*, *Romerolagus diazi*, *L. callotis* y *L. californicus* (Cervantes 1993, Villa y Cervantes 2003). No se tiene evidencia de que exista un tipo de interacción negativa entre el conejo montés y estas otras especies.

El área de permanencia coincidente, representa el área que cubren o abarcan las proyecciones actual, de los años 2010 y 2050 de ambas especies, y está localizada a lo largo del Eje Neovolcánico Transversal, que es una de las zonas con mayor riqueza de especies en México y el grupo de los lagomorfos no es la excepción (Cervantes 1993, Murguía-Carrara 2004, Romero-Palacios 2004, Sánchez-Cordero et al. 2005).

A partir de este trabajo se sugiere investigar si los movimientos observados de ambas especies (hacia el pie de la Sierra Madre Occidental en el caso de la liebre y a altitudes mayores en el conejo), obedecen a la falta de información que en general se tiene de las especies en México o es una señal de la respuesta geográfica a los cambios ambientales que se están dando desde los años 70's. En este sentido, se sugiere realizar los muestreos de campo en la época seca del año para que los temporales y la altura de los

pastizales no interfieran con la visibilidad de las especies durante los muestreos, y considerar el permanecer más tiempo en los sitios de muestreo, para evitar que las condiciones ambientales muy particulares afecten los resultados. Además, es necesario confirmar la presencia de la liebre torda en el sur y la del conejo montés en localidades fuera del centro del país, para tener una mejor representación del estado de las poblaciones de estas especies en México. Asimismo, se sugiere confirmar la presencia de estas especies en las áreas de distribución potencial donde se predicen pérdidas considerables: la liebre torda en localidades del noroeste del país y el conejo montés en la vertiente del Pacífico; incluyendo la evaluación de las condiciones del hábitat en el cual se presentan. De esta manera los valores de densidad y abundancia poblacional podrían ser incluidos dentro del análisis de estas especies y ayudarían a discernir qué tanto de estas modificaciones observadas en la actualidad se deben al cambio de uso de suelo o al cambio climático.

Finalmente, este trabajo es un primer paso que contribuye a subsanar la necesidad de información sobre los efectos del cambio climático en la distribución de las especies. La combinación del modelado de nichos y el trabajo de campo es una estrategia que permite apoyar las hipótesis del primero con datos empíricos. Esto permite, por un lado, robustecer los métodos de modelado y por otro cuantificar la magnitud y dirección del cambio climático en la distribución de las especies. La información generada puede ser utilizada para implementar estrategias de conservación que consideren escenarios futuros (Williams et al. 2006).

9. CONCLUSIONES

- Las áreas de distribución potencial actual de *Lepus callotis* y *Sylvilagus cunicularius* propuestas en este trabajo fueron consistentes con la distribución actual de las especies, al tener más del 70% de poder predictivo y minimizar los errores de comisión y omisión generados por el algoritmo (GARP).
- El efecto potencial del cambio climático bajo los dos escenarios de dispersión (sin dispersión y dispersión universal) fue mayor en la distribución geográfica potencial futura de *Lepus callotis*, como se esperaba para una especie que habita planicies, en comparación de *Sylvilagus cunicularius*, una especie montés. En el escenario de dispersión universal, los modelos de las distribuciones en los próximos 50 años confirmaron que las áreas de distribución de *L. callotis* y *S. cunicularius* mostrarían desplazamientos hacia mayores latitudes y altitudes, respectivamente.
- Las áreas de distribución potencial en el noroeste del país y Planicie Costera del Pacífico, son áreas que se presume sufrirán alteraciones importantes por efecto del cambio climático, por lo que se recomienda incluirlas dentro de planes para la conservación de estas especies.

10. LITERATURA CITADA

- Anderson, R. P., M. Laverde y A. T. Peterson. 2002. Geographical distributions of spiny pocket mice en South America: Insights from predictive models. *Global Ecology and Biogeography*, **11**: 131-141.
- Anderson, R. P., D. Lew, y A. T. Peterson. 2003. Evaluating predictive models of species' distributions: criteria for selecting optimal models. *Ecological Modelling*, **162**:211-232.
- Anderson, R. P. y E. Martínez-Meyer. 2004. Modeling species' geographic distributions for preliminary conservation assessments: an implementation with the spiny pocket mice (*Heteromys*) of Ecuador. *Biological Conservation*, **116**:167-179.
- Aranda, M. 2000. Huellas y otros rastros de los mamíferos grandes y medianos de México. Instituto de Ecología, A. C., Xalapa, México, 212 pp.
- Armstrong, D. M., y J. K. Jones, Jr. 1971. Mammals from the Mexican state of Sinaloa. I. Marsupialia, Insectivora, Edentata, Lagomorpha. *Journal of Mammalogy*, **52**:747-757.
- Arriaga L. y L. Gómez. 2004. Posibles efectos del cambio climático en algunos componentes de la biodiversidad de México. Pp 255-265. En: Martínez, J. y A. Fernández (comp.). *Cambio climático: una visión desde México*. SEMARNAT-INE, México.
- Austin, M. P., A. O. Nicholls y C. R. Margules. 1990. Measurement of the realized qualitative niche: Environmental niches of five *Eucalyptus* species. *Ecological Modelling*, **60**:161-177.
- Beker, R. H. y J. k. Green. 1962. Mammals of the Mexican state of Durango. Publications of Museum, Michigan State University. Biological Series, **2**:25-14
- Berdnaz, J. C. y J. A. Cook. 1984. Distribution and numbers of the white-sided jackrabbit (*Lepus callotis gaillardi*) in New Mexico. *The Southwestern Naturalist*, **29**:358-360.
- Best, T. L. y H. Travis. 1993. *Lepus callotis*. 1993. *Mammalian Species*, **442**:1-6.
- Brown, J. H. 1995. *Macroecology*. University of Chicago Press, Chicago.
- Brown, J. H. y M. V. Lomolino. 1998. *Biogeography*. 2nd ed. Sinauer Associates. Massachusetts, 691 pp.
- Campbell, J. A. 1999. Distribution patterns of amphibians in Middle America. Pp. 111-210. En: W. E. Dudley (ed.). *Patterns of distribution of amphibians. A Global Perspective*. The Johns Hopkins University Press, Baltimore and London.
- Carpenter, G., A. N. Gillison y J. Winter. 1993. DOMAIN: a flexible modeling procedure for mapping potential distributions of plants and animals. *Biodiversity and Conservation*, **2**:667-680.
- Ceballos, G. G. y C. Galindo. 1984. Mamíferos silvestres de la cuenca de México. Editorial Limusa, México, 299 pp.

- Ceballos, G. y A. Miranda. 2000. Guía de campo de los mamíferos de la costa de Jalisco/Field guide to the mammals of the Jalisco coast, México. Fundación Ecológica de Cuixmala-UNAM, México.
- Cervantes, A. F., 1993. Conejos y liebres silvestres de México. *Ciencia y Desarrollo*, **10**:58-69.
- Cervantes, A. F., C. Lorenzo, J. Vargas y T. Holmes. 1992 *Sylvilagus cunicularius*. *Mammalian Species*, **412**:1-4.
- Cervantes, F. A. y F. X. Gonzáles. 1996. Los conejos y liebres silvestres de México. Pp. 17-25. En: A. Velásquez, F. J. Romero y J. López (eds.). *Ecología y Conservación del Conejo Zacatuche y su hábitat*. UNAM y Fondo de Cultura Económica, México, 204 pp.
- Cervantes, F. A., C. Lorenzo, J. Vargas y T. L. Yates. 2002. Genio variation in population of Mexican lagomorphs. *Journal of Mammalogy*, **83**:1077-1086.
- Chapman, A. J. y G. G. Ceballos. 1990. The Cottontails. Pp. 95-110. En: J. A. Chapman and J. E. Flux (eds.). *Rabbits, Hares and Pikas. Status Survey and Conservation Action Plan*. IUCN/SSC Lagomorph Specialist Group.
- Chapman, A. J. y J. E. C. Flux. 1990. Rabbits, Hares and Pikas. Status Survey and Conservation Action Plan. IUCN/SSC Lagomorph Specialist Group.
- CONABIO. 2000. Cuencas de México. Escala 1:250, 000. México. Comisión Nacional para el Estudio de la Biodiversidad, México.
- Conway, M. C. 1976. A rare hare. *New Mexico Wildlife*, **21**(2):21-23.
- Dobson, A., A. Jolly y D. Rubenstein. 1989. The greenhouse effect and biological diversity. *Trends in Ecology and Evolution*, **4**:64-68.
- Elith, J., Graham, H. C., 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. McC., Peterson, A. T., Phillips, S. J., Richardson, K., Scachetti-Pereira, R., Schapire, R. E., Soberón, J., Williams, S., Wisz, M. S. y N. E. Zimmermann. 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 00:000-000.
- Elton, C. 1927. *Nicho. Animal ecology*. Sidgwick & Jacson, London, **3**:63-68.
- ESRI. 1999. ArcView GIS, versión 3.2. Environmental Systems Research Institute. Inc., Redlands, CA.
- Findley, J. S. 1987. The natural history of New Mexican mammals. University of New Mexico Press, Albuquerque, 164 pp.
- Flores-Villela, O. 1993. Herpetofauna of Mexico: Distribution and endemism. Pp. 253-280. En: T. P. Ramamorthy, R. Bye, A. Lot, and J. Fa (eds.). *Biological Diversity of Mexico Origins and Distribution*. Oxford University Press, New York.
- Gaston, K. 2003. The structure and dynamics of geographic ranges. Oxford University Press, Oxford.
- Gottfried, M., H. Pauli, K. Rriter y G. Grabherr. 1999. A fine-scaled predictive model for changes in species distribution patterns of high mountains plants induced by climate warming. *Diversity and Distributions*, **5**:241-251.

- Graham, R.W., E.L. Lundelius Jr., M.A. Graham, E.K. Schroeder, S.R. Toomey III, E. Anderson, A.D. Barnosky, J.A. Burns, C.S. Churcher, C.K. Grayson, R.D. Guthrie, C.R. Harrington, G.T. Jefferson, L.D. Martin, H.G. McDonald, R.E. Morlan, H.A. Semsken Jr., S.D. Webb, L. Werdelin y M.C. Wilson. 1996. Spatial response of mammals to late-Quaternary environmental fluctuations. *Science*, **272**:1601-1606.
- Grinnell, J. 1904. The Origin and Distribution of the Chestnut-Backed Chickadee. *Auk*, **21**:375-377.
- Grinnell, J. 1914. An account of the mammals and birds of the Lower Colorado Valley with special reference to the distributional problems presented. University of California Publications in Zoology, **12**:51-294
- Grinnell, J. 1917. The Niche-Relationships of the California Thrasher, *Auk*, **34**:427-433.
- Grinnell, J. 1924. Geography and evolution. *Ecology*, **5**:225-229.
- Grinnell, J. 1928. Presence and absence of animals. *University of California Chronicle*, **30**:429-450.
- Halffter, G. 1987. Biogeography of the montane entomofauna of Mexico and Central America. *Annual Review of Entomology*, **32**:95-114.
- Hall, E.R. 1981. The mammals of North America. Vol. I. Second edition. John Wiley and Sons, New York, 606 pp.
- Hirzel, A. H., J. Hausser, D. Chessel y N. Perrin. 2002. Ecological-niche factor analysis: How to compute habitat-suitability maps without absence data?. *Ecology*, **83**:2027-2036.
- Hoffmeister, D. F. 1986. Mammals of Arizona. The University of Arizona Press and The Arizona Game and Fish Department (Tucson), 602 pp
- Holt, R. D. 1990. The microevolutionary consequences of climate change. *Trends in Ecology and Evolution*, **5**:311-315.
- Hutchinson, G. E. 1957. Concluding Remarks. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, **22**:415-427.
- INEGI. 2000. Carta Topográfica. Escala 1:250,000. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México.
- IPCC. (Intergovernmental Panel on Climate Change) 1995. Climate Change 1995: The Scientific Basis. Group I, 2nd Assessment Report. Cambridge: WMO-UNEP. Cambridge University Press.
- IPCC. 2001. Tercer informe de evaluación. Cambio climático 2001. Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Grupo de trabajo II. Resumen para responsables de políticas y resumen técnico.
- Jaramillo, J. V. 1994. El cambio global: interacciones de la biota y la atmósfera. *Ciencias*, **35**:4-14.
- Krebs, R.H. 1978. Experimental ecology. The distribution and abundance problem.
- Leopold, A. S. 1959. Wildlife of México. The game birds and Mammals. University of California Press. Berkeley, Los Angeles, 568 pp.
- Magaña, R. V. O. y C. G. Gay. 2002. Vulnerabilidad y adaptación regional ante el cambio climático y sus impactos ambientales, sociales y económicos. *Gaceta ecológica*, **65**:7-23

- Magaña, R. V. O., Mátias, M. J., Morales, R. y C. Millán. 2004. Consecuencias presentes y futuras de la variabilidad y el cambio climático en México. pp. 203-213. En: Martínez, J. y A. Fernández (comp.). *Cambio climático: una visión desde México*. SEMARNAT-INE, México.
- Martínez-Meyer, E. 2002. Evolutionary trends in ecological niches of species. Tesis doctoral. Departamento de Geografía, Universidad de Kansas.
- Matson, J. O. y R. H. Baker. 1986. Mammals of Zacatecas. Spetial Publications, The Museum, Texas Tech University, **24**:1-88.
- Moore, D. M., B. G. Lees y S. M. Davey. 1991. A new method for predicting vegetation distributions using decision tree analysis in a geographic information system. *Environmental Management*, **15**:59-71.
- Morrone, J. J. y J. V. Crisci. 1992. Aplicaciones de métodos filogenéticos y panbiogeográficos en la conservación de la diversidad biológica. *Evolution Biology*, **6**:53-66.
- Morrone, J. J. y J. Márquez. 2001. Halfpter's Mexican Transition Zone, beetle generalized tracks, and geographical homology. *Journal of Biogeography*, **28**:635-650.
- Munguia-Carrara, M. 2004. Representatividad mastofaunística en Áreas Naturales Protegidas y Regiones Terrestres Prioritarias en el Eje Neovolcánico: Un modelo de conservación. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM, México, D. F.
- Navarro, S. A., Peterson, A. T., Nakazawa, U. Y. e I. Liebig-Fossas. 2003. Colecciones biológicas, modelaje de nichos ecológicos y los estudios de la biodiversidad. pp. 115-122. En: Morrone, J. J. y J. Llorente (eds.). *Una perspectiva latinoamericana de la biogeografía*. Las Prensas de Ciencias, Facultad de Ciencias-UNAM, México.
- Newton, P. C. D., H. Clark, G. R. Edwards y D. J. Ross. 2000. Experimental confirmation of ecosystem model predictions comparing transient and equilibrium plant responses to elevated atmospheric CO₂. *Ecology letters*, **4**:344-347.
- Nix, H.A. 1986. A biogeographic analysis of australian elapid snakes of Australia. Australian Government Publishing Service, Camberra.
- Ordóñez, D. J. A. 1999. Captura de carbono en un bosque templado: el caso de San Juan Nuevo, Michoacán. 1ª Edición. INE-SEMARNAP, México.
- Parmesan, C. .1996. Climate and species range. *Nature*, **382**:765-766.
- Parmesan, C., N. Ryrholm, C. Stefanescu, J. K. Hill, C. D. Thomas, H. Descimon, B. Huntley, L. Kaila, J. Kullberg, T. Tammaru, W. J. Tennent, J. A. Thomas y M. S. Warren. 1999. Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming. *Nature*, **399**:579-583.
- Parra-Olea, G., Martínez-Meyer, E. y G. Pérez-Ponce de León. 2005. Forecasting climate change effects on salamander distribution in the highlands of central Mexico. *Biotropica*, **37**:202-208.
- Pearson, R. G. y T. P. Dawson. 2003. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful?. *Global Ecology and Biogeography*, **12**:361-371.

- Pearson, R. G., Thuiller, W., Araújo, M. B., Martínez-Meyer, E., Brotons, L., McClean, C., Miles, L., Segurado, P., Dawson, T. P. y D. C. Lees. 2006. Model-based uncertainty in species range prediction. *Journal of Biogeography*, Author Compilation.
- Peters, R. L. y T. E. Lovejoy. 1992. *Global warming and biological diversity*. Yale University Press, New Haven, Connecticut.
- Peterson, A. T. y K. C. Cohoon. 1999. Sensitivity of distributional prediction algorithms to geographic data completeness. *Ecology Modeling*, **117**: 159-164.
- Peterson, A. T., J. Soberón y V. Sánchez-Cordero. 1999. Conservatism of ecological niches in evolutionary time. *Science*, **285**:1265-1267.
- Peterson, A. T., S. L. Egbert, V. Sánchez-Cordero y K. P. Price. 2000. Geographic analysis of conservation priority: endemic birds and mammals in Veracruz, Mexico. *Biological Conservation*, **93**:85-94.
- Peterson, A. T., V. Sánchez-Cordero, J. Soberón, J. Bartley, R. H. Buddemeier y A. G. Navarro-Sigüenza. 2001. Effects of global climate change on geographic distributions of Mexican Cracidae. *Ecological Modelling*, **144**:21-30.
- Peterson, A. T., M. A. Ortega-Huerta, J. Bartley, V. Sánchez-Cordero, J. Soberón, R. H. Buddemeier y D. R. B. Stockwell. 2002. Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature*, **416**:626-629.
- Peterson, A. T. 2003a. Subtle recent distributional shifts in great plains bird species. *Southwestern Naturalist*, **48**:289-292.
- Peterson, A. T. 2003b. Projected climate change effects on Rocky Mountain and great plains birds: generalities of biodiversity consequences. *Global Change Biology*, **9**:647-655.
- Price, J. 2000. Modeling the potential impacts of climate change on the summer distributions of Massachusetts passerines. *Bird Observer*, **28**:230-244.
- Rapoport, E. H. .1975. *Aerografía. Estrategias geográficas de las especies*. Obras de Ciencia y Tecnología. Fondo de Cultura Económica, México, 240pp.
- Rapoport, E. H. y J. A. Monjeau. 2001. *Aerografía*, pp. 23-30. En: Llorente, B. J. y J. J. Morrone (eds.). 2001. *Introducción a la biogeografía en Latinoamérica: teorías, conceptos, métodos y aplicaciones*. Las Prensas de Ciencias, Facultad de Ciencias-UNAM, México.
- Romero, L. 2004. Software para analizar las poblaciones de mamíferos. *Gaceta UNAM*, **3698**:8-9.
- Romero-Palacios, A. C. 2004. *Análisis de la distribución de los conejos y liebres (Lagomorpha: Leporidae) de México*. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. 70 pp.
- Ruedas, L. A. 1998. Systematics of *Sylvilagus* Gray, 1867 (Lagomorpha: Leporidae) from Southwestern North America. *Journal of Mammalogy*, **79**:1355-1378.
- Ruiz, S. L. G. y X. Cruz. 2004. Los gases de efecto invernadero y sus emisiones en México. pp. 109-121. En: Martínez, J. y A. Fernández (comp.). *Cambio climático: una visión desde México*. SEMARNAT-INE, México.
- Sánchez-Cordero, V. y E. Martínez-Meyer. 2000. Museum specimen data predict crop damage by tropical rodents. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **97**:7074-7077.

- Sánchez-Cordero, V., Peterson, A. T. y P. Escalante-Pliego. 2001. El modelado de la distribución de especies y la conservación de la diversidad biológica. pp. 359-379. En: Hernández, H. M., García, A. A., Álvarez, F. y M. Ulloa. (comp.). *Enfoques contemporáneos para el estudio de la biodiversidad*. Instituto de Biología, UNAM, México.
- Sánchez-Cordero, V., Cirelli, V., Munguía, M. y S. Sarkar. 2005. Place prioritization for biodiversity representation using species' ecological niche modeling. *Biodiversity Informatics*, **2**:11-13.
- Schoener, T. W. 1989. The ecological niche. pp. 79-114. En: J. M. Cherrett (ed.). *Ecological concepts: the contribution of ecology to an understanding of the natural world*. Blackwell Scientific, Oxford, England.
- SEMARNAP-INEGI-UNAM. (Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca; Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática; Universidad Nacional Autónoma de México-Instituto de Geografía). 2001. Inventario Nacional Forestal 2000. Escala 1:250,000. México.
- SID-UNAM. 2002. El potencial de investigación científica y tecnológica en México en materia de cambio climático. *Gaceta ecológica*, **65**:63-74.
- Smith R. L. y T. M. Smith. 2001. *Ecología*. Addison Wesley. México, D. F.
- Soberón, J. y A. T. Peterson. 2005. Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. *Biodiversity Informatics*, **2**:1-10.
- Stockwell, D. R. B. y I. R. Noble. 1992. Introduction of sets of rules from animal distribution data: A robust and informative method of analysis. *Mathematics and Computer in Simulation*, **33**:385-390.
- Stockwell D. R. B., S. M. Davis, J. R. Davis y I. R. Noble. 1990. Using induction of decision trees to predict greater glider density,. *AI Applications*, **4**:33-43.
- Stockwell D. R. B. 1993. LBS: Bayesian learning system for rapid expert system development. *Expert Systems With Applications*, **6**:137-147.
- Stockwell D.R.B. y D. Peters. 1999. The GARP modeling system: problems and solutions to automated spatial prediction. *International Journal of Geographic Information Systems*, **13**:143-158.
- Téllez-Valdés, O. y P. Dávila-Aranda. 2003. Protected areas and climate change: a case study of the cacti in the Tehuacán-Cuicatlán Biosphere Reserve, México, *Conservation Biology*, **17**:846-853.
- Thomas, C. D. y J. J. Lennon. 1999. Birds extend their ranges northwards. *Nature*, **399**:213.
- Thomas, C. D. A. Cameron, R. E. Green, M. Bakkenes, L. J. Beaumont, Y. C. Collingham, B. F. N. Erasmus, M. F. de Siqueira, A. Grainger, L. Hannah, L. Hughes, B. Hutley, A. S. van Jaarsveld, G. F. Midgley, L. Miles, M. A. Ortega-Huerta, A. T. Peterson, O. L. Phillips y S. E. Williams. 2004. Extinction risk from climate change. *Nature*, **427**:145-148.

- Toledo, V. M. 1982. Pleistocene changes in vegetations in Tropical México. Pp. 93-111. En: (G. T. Prance (ed.). *Biological diversification in the tropics*. Columbia University Press, New York.
- Troy, L. B. y H. H. Travis. 1993. *Lepus callotis*. Mammalian Species, **442**:1-6.
- Vandermeer, J. H. 1972. Niche theory. Annual Review of Ecology and Systematic, **3**:107-132.
- Vane-Wright, I., C. J. Humphries y P. H. Williams .1991. What to protect?. Systematics and the agony of choice. Biological Conservation, **55**: 235-254.
- Vargas, J. M. 1993. Siete pecados capitales en biogeografía. Zoológica Baetica, **4**:39:56.
- Vargas, C. J. 2000. Distribución, abundancia y hábitat de la liebre endémica *Lepus flavigularis* (Mammalia, Lagomorpha). Tesis de Maestría en Ciencias. División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F. 70 pp.
- Villa, B. y F. A. R. Cervantes. 2003. Los Mamíferos de México. Grupo Editorial Iberoamérica, Instituto de Biología, UNAM, México, D. F.
- Villers, L. e I. Trejo. 2004. Evaluación de la vulnerabilidad de los ecosistemas forestales. pp: 239-254. En: Martínez, J. y A. Fernández (comp.). *Cambio climático: una visión desde México*. SEMARNAT-INE, México.
- Villers-Ruiz, L. e I. Trejo-Vázquez. 1998. Climate change on Mexican forests and natural protected areas. Global Environmental Change, **8**:141-157.
- Vitousek, P. M. 1992. Global environmental change: An introduction. Annual Review of Ecology and Systematics, **23**:1-14.
- Warren, M. S., J. K. Hill, J. A. Thomas, J. Asher, R. Fox, B. Huntley, D. B. Roy, M. G. Telfer, S. Jeffcoate, P. Harding, G. Jeffcoate, S. G. Wills, J. N. Greatorex-Davies, D. Moss y C. D. Thomas. 2001. Rapid responses of British butterflies to opposing forces of climate and habitat change. Nature, **414**:65-69.
- Wemmer C., T. H. Kunz, G. Lundie-Jenkins y W. J. McShea. 1996. Mammalian Sign. Pp 157-176. En: Willson, et al., 1996 (eds.). *Measuring and Monitoring Biological Diversity. Standard Methods for Mammals*. Smithsonian Institution Press, Washington.
- Williams P., Hannah L., Andelman, S., Midgley, G., Araújo, M., Hughes, G., Manne, L., Martínez-Meyer, E. y R. Pearson. 2006. Planning for climate change: Identifying minimum-dispersal corridors for the cape Proteaceae. Conservation Biology, **19**:1063-1074.
- Wuethrich, B.. 1999. Mexican pairs show geography's role. Science, **285**:1190.