



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Escuela Nacional de Estudios Superiores,
Unidad Morelia

**Enfermedades transmitidas por garrapatas en
Norteamérica: zonas de vulnerabilidad y
riesgo debidas al cambio climático**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

P R E S E N T A

Kevin Alonso Perea García

DIRECTOR DE TESIS: DR. GUILLERMO NICOLAS MURRAY TORTAROLO

CO-TUTOR DE TESIS: DR. JULIAN ANDRES VELASCO VINASCO

MORELIA, MICHOACÁN

NOVIEMBRE, 2022



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.



ESCUELA
NACIONAL
de ESTUDIOS
SUPERIORES
UNIDAD MORELIA

10
años
(2011-2021)

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES UNIDAD MORELIA
SECRETARÍA GENERAL
SERVICIOS ESCOLARES

MTRA. IVONNE RAMÍREZ WENCE

DIRECTORA

DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR

PRESENTE

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria 06** del **Comité Académico** de la **Licenciatura en Ciencias Ambientales** de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) Unidad Morelia celebrada el día **13 de junio de 2022**, se acordó poner a su consideración el siguiente jurado para la presentación del Trabajo Profesional del alumno **Kevin Alonso Perea García** de la Licenciatura en **Ciencias Ambientales**, con número de cuenta **418127043**, con el trabajo titulado: **"Enfermedades transmitidas por garrapatas en Norteamérica: zonas de vulnerabilidad y riesgo debidas al cambio climático"**, bajo la dirección como **tutor** del **Dr. Guillermo Nicolás Murray Tortarolo** y como **Co-tutor** el **Dr. Julián Andrés Velasco Vinasco**.

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

Presidente:	Dr. Fernando Pineda García
Vocal:	Dr. César Andrés Torres Miranda
Secretario:	Dr. Guillermo Nicolás Murray Tortarolo
Suplente:	Dra. Fabiola Murguía Flores
Suplente:	Dra. Alma Virgen Mendoza Ponce

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Morelia, Michoacán a 13 de octubre de 2022.


DRA. YUNUEN TAPIA TORRES
SECRETARIA GENERAL

CAMPUS MORELIA

Antigua Carretera a Pátzcuaro N° 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta
58190, Morelia, Michoacán, México. Tel: (443)689.3500 y (55)5623.7300, Extensión Red UNAM: 80614
www.enesmorelia.unam.mx



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Escuela Nacional de Estudios Superiores,
Unidad Morelia

**Enfermedades transmitidas por garrapatas en
Norteamérica: zonas de vulnerabilidad y
riesgo debidas al cambio climático**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

P R E S E N T A

Kevin Alonso Perea García

DIRECTOR DE TESIS: DR. GUILLERMO NICOLAS MURRAY TORTAROLO

CO-TUTOR DE TESIS: DR. JULIAN ANDRES VELASCO VINASCO

MORELIA, MICHOACÁN

NOVIEMBRE, 2022

Agradecimientos Institucionales

Agradezco a la Escuela Nacional de Estudios Superiores unidad Morelia por permitirme estudiar la Licenciatura en Ciencias Ambientales.

Le agradezco a la DGAPA en el proyecto PAPIIT IA200722 y PAPIIT IA200420 por su apoyo para la realización de este proyecto.

Agradezco al Dr. Guillermo Nicolas Murray Tortarolo por ser mi tutor de tesis y apoyarme siempre que lo requería tanto en el ámbito académico como en el personal.

Agradezco al Dr. Julián Andrés Velasco Vinasco por ser mi co-tutor de tesis y atender las dudas que surgieron a lo largo del procedimiento.

También agradezco a mi jurado de examen conformado por el Dr. Fernando Pineda García, el Dr. César Andrés Torres Miranda, la Dra. Fabiola Murguía Flores y la Dra. Alma Virgen Mendoza Ponce por aportar con sus comentarios al enriquecimiento del escrito, así como el tiempo dedicado al mismo.

Agradecimientos Personales

Quiero agradecer a mi mamá y mi papá por apoyarme a concluir una meta importante en mi desarrollo personal y profesional, estando ahí día a día fomentándome a ser mejor persona.

A mis hermanos por estar siempre para lo que necesite y hacerme seguir adelante en cualquier momento.

A novia y amigas por estar acompañándome en toda la carrera y aportar buenos momentos y experiencias en todos los ámbitos.

Índice

Resumen.....	6
Abstract.....	8
1. Introducción.....	10
1.1 Enfermedades transmitidas por vectores	10
1.2 Cambio climático, salud humana y ETV.....	13
1.3 El incremento en las ETVs transmitidas por garrapatas.....	15
1.4 Impacto económico de las enfermedades transmitidas por garrapatas.....	18
2. Objetivo general	20
2.1 Objetivos específicos.....	20
3. Metodología.....	20
3.1 Obtención de datos de garrapatas y ordenamiento de base de datos	20
3.2 Obtención de datos climáticos actuales y futuros	21
3.4 Distribución potencial actual y futura de distintos géneros de garrapatas	22
3.5 Cartografía de comparación entre modelos y escenarios futuros y actuales.....	23
4. Resultados.....	25
4.1 Distribución Actual.....	25
4.2 Distribución Futura	27
4.2.1 Ixodes	27
4.2.2 Dermacentor	29
4.2.3 Amblyomma	31
4.2.4 Haemaphysalis	33
4.2.5 Rhipicephalus	35
5. Discusión	37
5.1 Cambios modelados en la distribución potencial de garrapatas en el siglo XXI	37
5.2 Implicaciones en la transmisión de enfermedades.....	39
5.3 Incertidumbre en la modelación.....	42
5.4 Limitaciones del estudio e investigación a futuro.....	45
6. Bibliografía	47

Índice de figuras

Figura 1. Diagrama de ciclo de vida del género Ixodes (Sonenshine D & Rore M. 2014)....	16
Figura 2. Mapa de incidencias de Lyme en Países Bajos por cada 100 mil habitantes en 1994, 2001 y 2005	18
Figura 3. Mapa de cartografía de observaciones	22
Figura 4. Distribución potencial actual de cinco géneros de garrapatas en Norteamérica. Los valores se indican de 0-1 como la probabilidad de presencia/ausencia de estos artrópodos en cada celda (0.1°).....	25
Figura 5. Distribución potencial para el año 2081 - 2100 del género Ixodes con base en los resultados climáticos de dos modelos globales y dos escenarios de emisiones contrastantes (SSP126 y SSP585).	27
Figura 6. Mapas comparativos del cambio en la distribución en ambos modelos y escenarios en comparación con la distribución actual para el género Ixodes	28
Figura 7. Distribución potencial para el año 2100 del género Dermacentor con base a los resultados climáticos de dos modelos globales y en dos escenarios de emisiones contrastantes (SSP126 y SSP585).....	29
Figura 8. Mapas comparativos del cambio en la distribución en ambos modelos y escenarios en comparación con la distribución actual para el género Dermacentor.	30
Figura 9. Distribución potencial para el año 2100 del género Amblyomma con base a los resultados climáticos de dos modelos globales y dos escenarios de emisiones contrastantes (SSP126 y SSP585)	31
Figura 10. Mapas comparativos del cambio en la distribución en ambos modelos y escenarios en comparación con la distribución actual para el género Amblyomma.....	32
Figura 11. Distribución potencial para el año 2100 del género Heamaphysalis con base en los resultados climáticos de dos modelos globales y dos escenarios de emisiones contrastantes (SSP126 y SSP585).....	33
Figura 12. Mapas comparativos en la distribución en ambos modelos y escenarios en comparación con la distribución actual para el género Haemaphysalis.	34
Figura 13. Distribución potencial para el año 2100 del género Rhipicephalus con base en los resultados climáticos de dos modelos globales y en dos escenarios de emisiones contrastantes (SSP126 y SSP585).....	35
Figura 14. Mapas comparativos en la distribución en ambos modelos y escenarios en comparación con la distribución actual para el género Rhipicephalus.	36
Figura 15. Mapas distribución futura para Amblyomma americanum en Norteamérica en los escenarios RCP 4.5 (a) y RCP 8.5 (b) (Raghavan et al. 2019).	38
Figura 16. Mapas de área de en riesgo de extrapolación de las condiciones climáticas actuales a futuras (Marques et al. 2020).	39
Figura 17. Mapas de casos registrados para la enfermedad de Lyme en Estados unidos en diferentes años, 2000 (a), 2005 (b), 2010 (c) y 2018 (d)	41
Figura 18. Mapas de casos registrados para la enfermedad de Lyme en Canadá en diferentes años, 2009 (a), 2013 (b), 2016 (c) y 2019 (d)	42
Figura 19 Área potencial de distribución para la especie Melanerpes chrysogenys con seis algoritmos diferentes	44

Resumen

Las enfermedades transmitidas por vectores son aquellas que para la infección (contagio) en su hospedero requieren de otros organismos vivos, principalmente insectos u otros artrópodos hematófagos (mosquitos, moscas, piojos, chinches, pulgas y garrapatas) y son ocasionadas por microorganismos (virus, bacterias, protozoarios u hongos). Dentro de los vectores más comunes se encuentran las garrapatas. Las garrapatas son transmisoras de enfermedades como Lyme, babesiosis, anaplasmosis, ehrliquiosis, rickettsiosis, entre otras. Estas enfermedades representan un problema económico y de salud pública, debido a que el costo de tratamiento es alto y el nivel de gravedad de las enfermedades transmitidas por estos organismos suelen ser alto.

En las últimas dos décadas, la presencia de casos de enfermedades transmitidas por vectores se ha incrementado a nivel global y particularmente en Norteamérica. Se ha documentado que de las variables más importantes para la distribución de los vectores es el clima y todas las afectaciones al mismo ya sea a temperatura o humedad se relacionan con cambios en el grado de incidencia de enfermedades. Por las razones anteriores es primordial estudiar el posible impacto que el cambio climático tendrá en los vectores transmisores de enfermedades y, de esta manera proponer estrategias para la toma de decisiones y ejecutar acciones de prevención en las zonas posiblemente afectadas.

Para atender lo anterior, en esta tesis se modeló la distribución actual y futura (2081 - 2100) de cinco géneros de garrapatas (*Ixodes*, *Dermacentor*, *Amblyomma*, *Haemaphysalis* y *Rhipicephalus*) en Norteamérica, mediante el procesamiento los datos de presencia obtenidos de la plataforma de Global Biodiversity Information Facility (GBIF) y las variables bioclimáticas de Worldclim 2 en el programa de R con el algoritmo de MaxEnt. Con base en ambas distribuciones (actual y futura). Se realizaron mapas comparativos de presencia, con la finalidad de observar las diferencias entre ambos mapas de distribución y ver las zonas de pérdida, de ganancia y de permanencia.

Como primer resultado se observó que las cinco especies de garrapatas tendrán un posible desplazamiento hacia el noreste y noroeste de su distribución actual en Estados Unidos y Canadá. En el caso de México, aunque las cinco especies tienen distribución actual, ninguna de ellas está presente en las distribuciones futuras. De

los cinco géneros analizados, cuatro de ellas (*Ixodes*, *Dermacentor*, *Amblyomma* y *Haemaphysalis*), se hipotetiza que tendrán una reducción en sus áreas de distribución futuras, mientras que *Rhipicephalus* presentaría en la distribución futura presentó un área potencial de distribución mucho más extensa que las demás, mostrando presencia en la parte centro este y oeste de Estados Unidos. Los resultados obtenidos se relacionan con un aumento potencial de casos registrados de enfermedades transmitidas por garrapatas en diferentes partes de Estados Unidos y Canadá, mientras que en México se hipotetiza la reducción casi total de sus áreas de distribución.

Abstract

Vector-borne diseases are those that require other living organisms, mainly insects or other hematophagous arthropods (mosquitoes, flies, lice, bedbugs, fleas and ticks) for infection (contagion) in their host and are caused by microorganisms (viruses, bacteria, protozoa or fungi). Among the most common vectors are ticks. Ticks are transmitters of diseases such as Lyme, babesiosis, anaplasmosis, ehrlichiosis, rickettsiosis, among others. These diseases represent an economic and public health problem, since the cost of treatment is high and the level of severity of the diseases transmitted by these organisms is usually high.

In the last two decades, the presence of cases of vector-borne diseases has increased globally and particularly in North America. It has been documented that one of the most important variables for the distribution of vectors is the climate, and any changes in temperature or humidity are related to changes in the degree of disease incidence. For the above reasons, it is essential to study the possible impact that climate change will have on disease-transmitting vectors and, in this way, propose strategies¹ for decision making and implement preventive actions in possibly affected areas.

To address the above, in this thesis we modeled the current and future distribution (2081 - 2100) of five genera of ticks (*Ixodes*, *Dermacentor*, *Amblyomma*, *Haemaphysalis* and *Rhipicephalus*) in North America, by processing the presence data obtained from the Global Biodiversity Information Facility (GBIF) platform and the bioclimatic variables of Worldclim 2 in the R program with the MaxEnt algorithm. Based on both distributions (current and future). Comparative maps of presence were made, with the purpose of observing the differences between both distribution maps and to see the zones of loss, gain and permanence.

As a first result, it was observed that the five tick species will have a possible displacement towards the northeast and northwest of their current distribution in the United States and Canada. In the case of Mexico, although all five species have current distributions, none of them are present in future distributions. Of the five genera analyzed, four of them (*Ixodes*, *Dermacentor*, *Amblyomma* and *Haemaphysalis*) are hypothesized to have a reduction in their future distribution areas, while *Rhipicephalus* would present a much larger potential distribution area in the future distribution than the others, showing presence in the central eastern and western part of the United

States. The results obtained are related to a potential increase of registered cases of tick-borne diseases in different parts of the United States and Canada, while in Mexico, an almost total reduction of its distribution areas is hypothesized.

1. Introducción

1.1 Enfermedades transmitidas por vectores

Las enfermedades transmitidas por vectores (ETV) son aquellas que se contagian a través de organismos vivos, en su mayoría artrópodos hematófagos, que son portadores de algún parásito, virus, bacterias, protozooario u hongo, que es transferido a personas o animales mediante picaduras. La característica fundamental de las ETV se debe a que son enfermedades causadas por bacterias o parásitos que necesitan forzosamente un hospedero para su transferencia (Organización Mundial de la Salud, 2017).

Los principales vectores son artrópodos como los mosquitos (Familia Culicidae), moscas (Familia Simuliidae, Subfamilia Phlebotominae), piojos (Familia Pediculidae), chinches besuconas (Familia Reduviidae), pulgas (Orden Siphonaptera) y garrapatas (Familia Ixodidae), aunque también puede referir a contagios de caracoles (Familia Planorbidae). Las principales enfermedades transmitidas por protozoarios, son de los géneros, *Plasmodium*, *Leishmania*, *Onchocerca*, *Trypanosoma* y *Arbovirus*, pertenecientes a la familia Flaviviridae, en el caso de las bacterias destacan las rickettsias de las especies *Rickettsia rickettsii*, *R. prowazekii* y *R. typhi*. (Secretaría de salud, 2001, Mullen et al 2019).

Anualmente, a nivel mundial se han identificado más de 1000 millones de casos y más de un millón de fallecidos en el mundo, a causa de las ETV, representando alrededor del 17% de los registros de las enfermedades infecciosas. Las enfermedades más comunes dentro de las ETV son el paludismo, dengue, Chagas, filariasis linfática, oncocercosis, leishmaniasis, chikungunya, zika, fiebre amarilla, encefalitis japonesa y esquistosomiasis (Organización Mundial de la Salud, 2017).

En México, las ETVs son un serio problema de la salud pública, por diversos factores. En primer lugar, porque alrededor del 60% del territorio nacional tiene condiciones de temperatura y humedad favorables para los transmisores, dejando a todos los sectores (agrícola, ganadero, industrial, pesquero, petrolero y turístico)

vulnerables (Secretaría de Salud. 2018). En segundo lugar, debido a la presencia de distintos tipos de ETVs tales como paludismo, dengue, oncocercosis, tripanosomiasis, leishmaniosis, rickettsiosis y arbovirosis (Secretaría de Salud. 2018), y recientemente la enfermedad de Lyme. Lo anterior se conjuga con la vulnerabilidad asociada a la pobreza económica. Por ejemplo, en 2018 solo el 23.7% es considerada no pobre y no vulnerable, mientras que 26.4% de la población fue considerada población vulnerable por carencias sociales como servicios de salud o servicios básicos de vivienda (CONEVAL. 2018). Ese mismo año la Secretaría de Salud reportó cerca de 40 mil casos de contagios de ETV. En dicho reporte sólo consideradas algunas ETV como: dengue, zika, fiebre amarilla, chikungunya y rickettsiosis, desestimando otras ETV debido a que se ha presentado un decremento en los casos registrados.

En Canadá debido al aumento de la temperatura y de las precipitaciones se ha presentado un incremento de casos de diversas enfermedades transmitidas por vectores como virus del Nilo Occidental y Lyme. En el caso de Lyme, los casos registrados han ido aumentando exponencialmente durante cinco años en zonas urbanas. Enfermedades transmitidas por mosquitos como Zika, chikungunya o dengue, no se han presentado debido a los climas de la región (Lindsay, 2016). En Estados Unidos, las enfermedades transmitidas por mosquitos y garrapatas son las más comunes (Lyme, arbovirus, virus del Nilo Occidental, fiebre de las Montañas Rocosas, dengue, zika, entre otros), estas han presentado un incremento desde el 2004 (Curriero et al, 2021 & Rosenberg et al 2018).

Uno de los aspectos más preocupantes dentro del contexto de las ETV, ha sido la expansión de la distribución geográfica de sus vectores asociados, causando el aumento del número de contagios en Norteamérica, así como la aparición de enfermedades antes inexistentes en estas nuevas zonas idóneas para su distribución (e.g. *Lyme*). En ese sentido, uno de los factores fundamentales para la determinación del nicho de los vectores asociados a las ETV, es el clima, (Reyes et. al. 2019), ya que las condiciones de temperatura y humedad impactan favorablemente las fases del desarrollo de los vectores (Randolph, 2000 & Rohr. et al. 2011). De acuerdo con Githeko et al, (2000) la presencia de los vectores es predominante en zonas tropicales y subtropicales en donde las condiciones cálidas y húmedas son idóneas ideales para los vectores. Esto deja en evidencia la importancia de las condiciones climáticas en la distribución de los vectores de las enfermedades.

Como resultado de lo anterior, las modificaciones en el clima global han derivado en un cambio en la presencia, la distribución y la frecuencia de las ETVs. De acuerdo con Barclay (2008), por causas del cambio climático, en diferentes partes del mundo se han registrado casos de ETV fuera de sus zonas “endémicas”. Por ejemplo, el Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad de España (2016) reportó que en los años 2007 y 2014 hubo brotes de zika en países pertenecientes a Micronesia e islas como Polinesia Francesa, Nueva Caledonia y otras islas del Pacífico. Normalmente, esta enfermedad se presentaba en territorios de África y Asia. Además, a consecuencia del cambio climático en Suecia se registró un aumento en la distribución y la densidad de las garrapatas (TaLleklint et al, 1998). De manera similar, de acuerdo con Murray-Tortarolo (2014), enfermedades como Lyme, dengue, Chagas y malaria, han tenido un incremento en el número de casos registrados, los cuales se han presentado en zonas en las que anteriormente no se habían registrado este tipo de ETV.

Esto ha derivado en un creciente interés de la comunidad científica por entender el posible impacto del cambio climático sobre la distribución de las ETV a distintas escalas espaciales y temporales.

1.2 Cambio climático, salud humana y ETV

El clima se define como el estado promedio que presenta la atmósfera en un lugar determinado de la superficie terrestre en un periodo de tiempo extenso. Es resultado de la interacción entre diferentes esferas globales como atmósfera, hidrosfera, litosfera, biosfera y antroposfera, mejor conocido como el sistema climático. Se determina mediante la realización de un análisis del conjunto de datos meteorológicos, normalmente periodos de 30 años. El clima suele variar por aspectos geográficos y estacionales como son latitud, altitud, relieve, corrientes marinas, precipitación, distribución de tierras y aguas, entre otros. (IPCC, 2018, Hubp, 2011, IDEAM, 2009).

Debido a que las condiciones climáticas dependen de la interacción de las cinco esferas del sistema climático, se puede ver modificado mediante la dinámica interna del sistema o también bajo la influencia de forzamientos externos. Dentro de estos forzamientos encontramos las variaciones solares, las erupciones volcánicas, o las actividades antrópicas, mediante el cambio de uso del suelo o mediante la modificación de la composición en los gases de la atmósfera con la generación de los gases de efecto invernadero [GEI] (IPCC, 2013). No obstante, en la actualidad los forzamientos externos no antrópicos representan una parte mínima en la modificación del sistema climático en comparación con el gran peso que es producido mediante la actividad antrópica (Benavides et. al, 2007, NASA, s.f).

El IPCC (2014) concluyó que en los últimos 50 años, la actividad humana es la responsable del cambio climático actual. Esto se debe a que en este último siglo, las actividades industriales han ocasionado un aumento exponencial en los gases de efecto invernadero, tales como el CO₂, que aumentó de 280 ppm a 415 ppm; el N₂O, que se incrementó de 269 a 331 ppm; y el CH₄, que se elevó de 721 ppm a 1869 ppm (OMM, 2019). El incremento de estos gases está relacionado directamente con un calentamiento global promedio de 0.85°C en un periodo de 138 años (1880 a 2018), ocasionado por cambios en la composición de los gases que componen la atmósfera (NOAA, 2020)

El aumento de la temperatura global tiene serios impactos en otros componentes del sistema global (WMO, 2020), en lo que se ha denominado cambio

climático global. Tal es el caso del derretimiento de los glaciares y los hielos polares (Vaughan et al, Doake, 1996; Heaberly. 1998), un incremento de las lluvias en las latitudes medias del hemisferio norte del planeta, una disminución de la cantidad y de la temporada de nieve (Beniston, 1997), un aumento en la frecuencia de olas de calor y lluvias intensas, entre otras (IPCC, 2013). También se han registrado varios casos de afectaciones a la biodiversidad, ya sea en la distribución de las especies (Peterson et al 2002), la pérdida de hábitats o al cambio en la composición de los bosques (Rekacewicz, 2005).

El impacto generado del cambio climático afecta a la humanidad de formas directas e indirectas. (Martens, 1998). De acuerdo con Patz et al., (1996) dentro de las afectaciones directas sólo se encuentra el estrés térmico, mientras que en las afectaciones indirectas se encuentran afectaciones a la productividad de alimento, contaminación del aire, incremento en el nivel de los mares, desastres naturales, enfermedades transmitidas por medios marinos y enfermedades transmitidas por vectores.

En el caso de los vectores y los patógenos transmitidos se han visto especialmente beneficiados por el aumento de la temperatura global y la alteración en los patrones de lluvia (Cerde, 2008). Un ejemplo de esto es la malaria, de acuerdo con Katherine et al., (2007) el incremento de la temperatura y los cambios en los patrones de lluvia, benefician el desarrollo del parásito transmisor de la malaria y a su vez, la expansión del hábitat del mosquito *Anopheles*, que funciona como su transmisor, hacia altitudes y latitudes mayores. Estas zonas eran consideradas libres de malaria, por lo que propiciaría un incremento en el número de personas susceptibles a la enfermedad transmitida.

Otro caso relacionado con el impacto del cambio climático es la distribución completa en los trópicos y al igual que la del dengue y la malaria. El vector de esta enfermedad se ha visto especialmente beneficiado, debido a que normalmente presenta sus periodos estacionales de mayor actividad, los cuales corresponden a estaciones donde la temperatura y la humedad son mayores (Cerde, et al. 2008).

Las garrapatas son el primer vector de importancia a nivel veterinario y el segundo seguido de los mosquitos en términos de salud (Mullen et al 2019). La distribución espacial de las garrapatas está determinada principalmente por las condiciones climáticas y la vegetación siendo un factor secundario, pero no menos importante la distribución de los hospederos (Randolph, 2000). Al igual que la mayoría

de los vectores, las garrapatas tienen mayor presencia en las regiones tropicales y subtropicales del mundo. (Githeko. et al, 2000). De acuerdo con un estudio realizado en Suecia por Lindgren. (2001) las enfermedades transmitidas por garrapatas aumentaron por las condiciones climáticas asociadas a sus estaciones cálidas en primavera y verano. La temperatura media de principios de otoño y finales de invierno tuvo un aumento de temperatura de dos grados centígrados, permitiendo así que la actividad de las garrapatas se viera extendiera.

1.3 El incremento en las ETVs transmitidas por garrapatas

Las garrapatas son quelicerados hematófagos pertenecientes a la subclase *Acari* y al orden *Ixodida* (Sonenshine & Rore 2014). El ciclo de vida de estos arácnidos consta de cuatro fases, las cuales comienzan con su formación dentro del huevo y tres etapas de parasitismo activo larva, ninfa y adulto. Para el desarrollo de cada una de las etapas activas, es necesario que se alimente de algún hospedero hasta que se haya completado. Si la garrapata es removida antes de completar su ciclo, el macho tendría que desarrollarse con lo obtenido, mientras que las hembras, tienen la posibilidad de seguir a la siguiente fase del ciclo o incorporarse a otro organismo para completar la fase (Sonenshine & Rore. 2014).

Dependiendo del género de garrapata, varía el número de hospederos necesarios para el desarrollo de sus diferentes fases. En el caso del género *Ixodes*, son necesarios hasta tres hospederos (figura 1), mientras que algunas especies del género *Dermacentor* y *Hyalomma* necesitan entre uno y dos hospederos, respectivamente, para que se complete su desarrollo (Sonenshine & Rore. 2014).

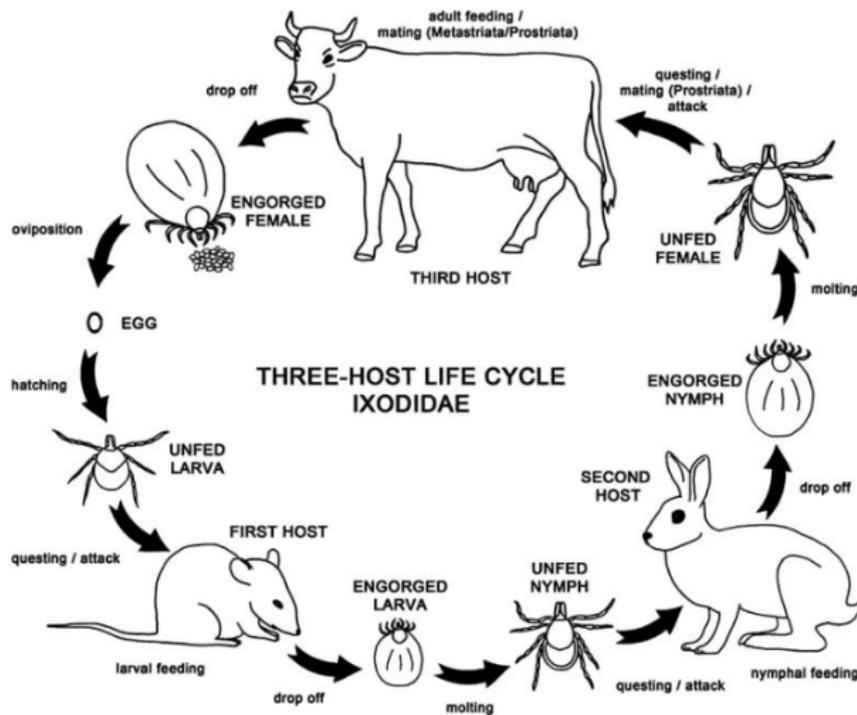


Figura 1. Diagrama de ciclo de vida del género *Ixodes* (Sonenshine D & Rore M. 2014).

Si bien no todas las mordeduras de las garrapatas causan enfermedades, son éstas las que más tipos de enfermedades transmiten. Las garrapatas pueden transmitir enfermedades de origen vírico o bacteriano. Dentro de las principales están enfermedades causadas por virus se encuentran: fiebre hemorrágica de Crimea-Congo (*Nairovirus*) y la encefalitis (*Flavivirus*), que son transmitidas por garrapatas *Hyalomma* e *Ixodes ricinus* asociadas a mamíferos domésticos y roedores. Entre las enfermedades asociadas a bacterias destacan la de Lyme (*Borrelia burgdorferi* transmitida por *Ixodes scapularis*), borreliosis o de fiebre recurrente (*Borrelia* spp. Transmitida por *Ornithodoros* spp.), rickettsiosis (transmitidas en las Rocallosas por *Dermacentor andersoni*, en otras regiones de EU por *Dermacentor variabilis*, en América del Sur por *Amblyomma cajennense* y en México por *Rhipicephalus sanguineus*), fiebre maculosa de las Rocallosas (*Rickettsia rickettsi* transmitida por *Dermacentor variabilis*) tularemia o fiebre de los conejos (*Francisella tularensis* transmitida por *Ixodes* spp.), erliquiosis (*Ehrlichia chaffeensis* transmitida por *Amblyomma americanum*), anaplasmosis (*Anaplasma phagocytophilia* transmitida por *Ixodes scapularis*). Los vectores asociados a estas enfermedades bacterianas son principalmente mamíferos pequeños (ratones y ardillas) y algunas especies

domésticas (ganado, perros y gatos), aunque algunas de ellas parecen haberse dispersado por algunas aves (De la fuente et. al, 2008).

En 2017 la Organización Mundial de la Salud (OMS) reporta que anualmente se registran más de 700 mil casos de enfermedades transmitidas por garrapatas en el mundo. En Norteamérica y Europa, enfermedades como Lyme (*Borrelia*) representan un verdadero problema debido al número de casos y a los síntomas crónicos de los pacientes afectados (Pfister, et al, 1994). Tan solo en España se registran 70 mil casos anuales (OCV, 2017), mientras que en Estados Unidos la cifra ronda en los 300 mil casos de Lyme (Kuehn et. al, 2013). Estas enfermedades no sólo se encuentran distribuidas en Norteamérica y Europa, también se registran casos en Australia, Chile, Brasil, Alemania, Suecia, Italia y algunos países del continente Asiático. (Gordillo, et al, 2010).

En Europa se observó un incremento del 300% de la población de las garrapatas que transmiten encefalitis en los últimos 50 años, esto sucedió a causa del cambio climático y del cambio del uso del suelo. Este crecimiento poblacional ocasionó a su vez un incremento de casos del 400% en los últimos 30 años, dejando cifras de 13 mil casos de encefalitis (Rizzoli et, al, 2009). Asimismo, en Italia ya se han registrado casos de encefalitis, Lyme, ehrliquiosis, y otras pertenecientes a *Rickettsia* y *Babesia*. (Piccolin et, al 2006).

En el caso de la enfermedad de Lyme en Europa para 1994 (figura 2) se informó que anualmente había un estimado de 39 personas infectadas por cada 100 mil, en 2001 74 personas afectadas por cada 100 mil y en el 2005 se obtuvo un estimado de 446 personas infectadas por cada 100 mil, mostrando un incremento en el número de casos registrados con el paso de los años (Hofhuis, et al, 2006).

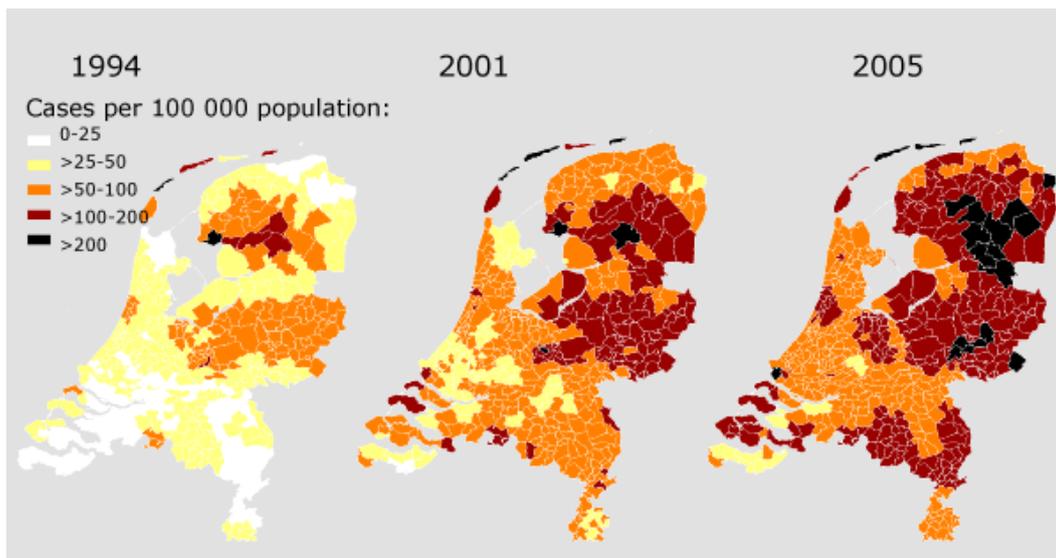


Figura 2. Mapa de incidencias de Lyme en Países Bajos por cada 100 mil habitantes en 1994, 2001 y 2005 (Hofhuis, et al, 2006)

En México, ya se han presentado casos de enfermedades inexistentes hasta hace 30 años como Lyme y rickettsiosis, las cuales aparecieron en Monterrey y Sinaloa en 1991 (Arroyave et al 1994 citado en Gordillo, et al. (2010). Los casos más recientes de esta enfermedad se han presentado en diversas partes del territorio mexicano; Gordillo, et al (2010), reportan que en 2003 el 6.3% de la población del noreste de México y el 3.4% de la población de la Ciudad de México se habían contagiado de la enfermedad de Lyme. Mientras que en el 2007 se reportaron los primeros casos en el Valle de México, Quintana Roo y Veracruz. (Colunga, et, al 2020). De acuerdo con Colunga et al. (2020) en el último año se han presentado casos de la enfermedad de Lyme en 19 de los 32 estados de la república, siendo los más afectados los estados de Nuevo León, Tamaulipas, Sinaloa y Aguascalientes. En el caso de Rickettsia, la Secretaría de Salud (2016) se han presentado casos en 24 de los 32 estados, siendo los más afectados Sonora, Baja California, Chihuahua y Coahuila.

1.4 Impacto económico de las enfermedades transmitidas por garrapatas

Desde el punto de vista socioeconómico, estas enfermedades son particularmente preocupantes ya que las medidas de prevención y sus tratamientos representan un gasto económico considerable para las personas que lo padecen, además de que existe la posibilidad de que las personas afectadas sean las principales aportadoras

del ingreso económico en el hogar. Esto significa que habría una disminución de los ingresos económicos que de por sí ya se van a ver afectados por el gasto del tratamiento (Zhang et al. 2006).

El tratamiento de la encefalitis transmitida por garrapatas representa un gran costo para los sistemas de salud, debido a que se requiere cuidado intensivo de los pacientes, además las personas pueden verse afectadas con secuelas cognitivas o neuropsiquiátricas (Mantke, et al. 2008).

En Estados Unidos, Zhang et al (2006) estimaron el costo del tratamiento por mordeduras por garrapatas rondando en los \$108 dólares estadounidenses (USD), mientras que el de la enfermedad de Lyme varía desde los \$396 USD a los \$923 USD por tratamiento, llegándose a necesitar hasta 24 sesiones. Adrion et al (2015) reporto que el costo del tratamiento de la enfermedad de Lyme ronda de los \$100 USD a los \$10,000 USD, siendo el más económico el realizado en una fase temprana, en contra parte, el más costoso se aplica en una fase tardía de la enfermedad. Esta estimación de costos solo toma en cuenta lo que se gastó en 12 meses de tratamiento, por lo tanto, deja de lado los gastos ocasionados por las posibles secuelas de la enfermedad.

En el caso de México desconocemos los costos económicos y sociales de este tipo de enfermedades. Por ello se requiere tomar en cuenta los factores de vulnerabilidad de la población, ya que las afectaciones generadas por el contagio de enfermedades como Lyme, encefalitis o rickettsiosis, no representa la misma carga económica para todas las personas. La vulnerabilidad depende de diversos factores como la disponibilidad de recursos, la estabilidad social, la riqueza económica, buena asignación de los bienes públicos, entre otros (Robert, 2004)

2. Objetivo general

Identificar zonas de riesgo potencial ante la expansión de las enfermedades transmitidas por garrapatas en Norteamérica, debido al cambio climático.

2.1 Objetivos específicos

- Realizar una búsqueda exhaustiva de registros de presencia de garrapatas en América del Norte.
- Delimitar la distribución potencial de distintos géneros de garrapatas responsables de la transmisión de ETVs en Norteamérica, en función de su nicho climático.
- Generar proyecciones de la distribución potencial de las garrapatas en diferentes escenarios de cambio climático en Norteamérica.

3. Metodología.

3.1 Obtención de datos de garrapatas y ordenamiento de base de datos

Los datos de presencia de garrapatas en Norteamérica, fueron obtenidos a través del sitio web de Global Biodiversity Information Facility (GBIF, 2021), una vez dentro se buscó la familia *Ixodidae* con el fin de que nos brindara toda la información disponible de los diferentes géneros de garrapatas de los cuales dispone la plataforma.

Una vez seleccionados los datos, las especificaciones que se dieron para la obtención de datos fueron las siguientes:

- Localización - México, Estados Unidos y Canadá con disposición de coordenadas geográficas
- Años y meses - Todos los disponibles
- Bases de datos - Todas las disponibles

Una vez seleccionadas las especificaciones, se descargó en formato simple (ID, reino, phylum, clase, orden, familia, genero, especie, taxón, nombre científico, país, localidad, estado, conteo, coordenadas, elevación, entre otros) fecha que las

imágenes y los datos crudos no eran necesarios en este caso. Al tener descargados los datos de presencia se revisó que estos cumplieran con las especificaciones necesarias (género, especie, nombre científico, país, localidad, latitud, longitud, elevación y fecha del registro) para su uso posterior. Para ello, se eliminaron los datos incompletos o que carecían de información geográfica o género.

Después de eliminar los datos incompletos, se dio un formato homogéneo a la base de datos el cual consistió en eliminar todas las mayúsculas, cambiar los espacios por guiones bajos y mantener un tipo de signo ya sea alfabético o numérico en cada casilla de la tabla. Como resultado final se obtuvo una tabla con 21822 entradas de presencia de garrapatas en Norteamérica, con 11737 registros para Estados Unidos, 7146 registros para México y 2398 para Canadá.

3.2 Obtención de datos climáticos actuales y futuros

Para la obtención de los datos climáticos actuales se recurrió a la página web de WorldClim 2 (Fich et al 2017) y se descargó la segunda versión de las variables bioclimáticas cada 2.5 minutos. Las variables consultadas fueron las 19 bioclimáticas disponibles (Ver anexo 1).

En el caso de los datos futuros, se usó el periodo 2081 – 2100 correspondiente al CMIP6. Se descargaron dos diferentes modelos IPSL-CM6A-LR y MIROC6 y dos escenarios para cada uno, ssp126 y ssp585 con la finalidad de observar las diferencias entre modelos y escenarios. Debido a que es necesario utilizar las mismas variables para poder hacer una buena predicción, las variables consultadas fueron las 19 bioclimáticas disponibles (Ver anexo 1).

3.3 Cartografía de observaciones

La cartografía de las observaciones de garrapatas y todos los demás procedimientos posteriores se llevaron a cabo en el programa de R statistical software (R, 2021). Se realizó un procedimiento de depuración de los datos eliminando todas coordenadas duplicadas por cada género.

Una vez hecha la segunda depuración se hizo la cartografía de todas las observaciones obtenidas por género de garrapata con los paquetes de ggplot2, raster, sp, dismo, sphin, rgdal, mapdata, maps, tidyverse y ggthemes (figura 3).

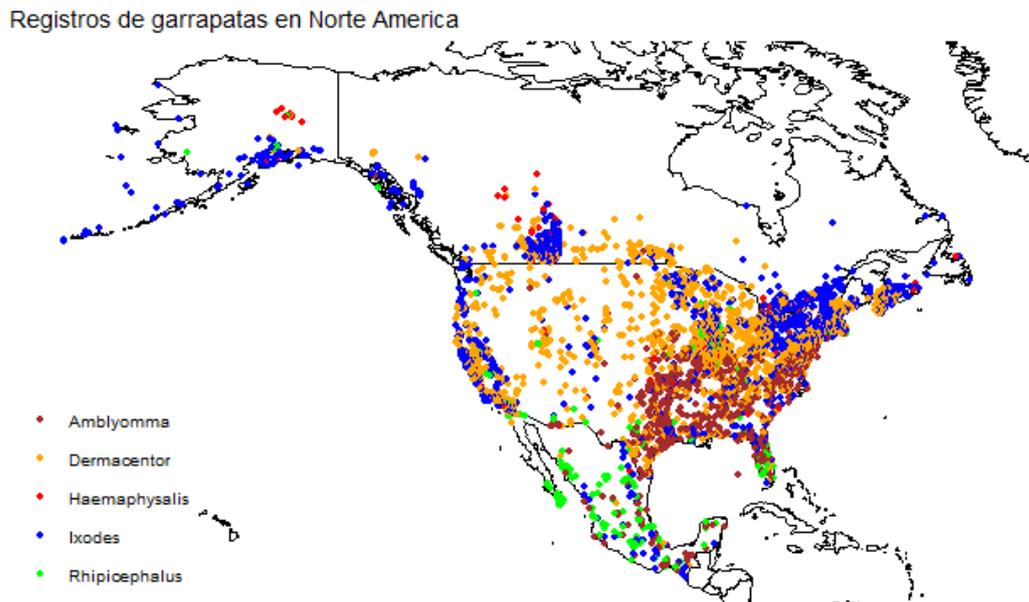


Figura 3. Mapa de cartografía de observaciones

3.4 Distribución potencial actual y futura de distintos géneros de garrapatas

Los datos utilizados para la predicción de la distribución fueron los registros de presencia de garrapatas en Norteamérica y los datos climáticos obtenidos en la plataforma de WorldClim 2.

Con los datos de presencia de garrapatas se dejaron solamente 2 columnas una fue el nombre del género y la otra las coordenadas geográficas. Posteriormente se utilizó la herramienta “thin” para evitar la correlación espacial de los datos de distribución de 5 km. En el caso de las variables climáticas se seleccionaron las que tuvieran con menor colinealidad con la función vifcor en R para después excluirlas y de esta, manera, modelar el nicho de las especies con las variables de menor colinealidad. Como resultado quedaron las variables BIO 5 (temperatura máxima en el mes más cálido), BIO 8 (temperatura media en el cuartil más húmedo), BIO 9 (temperatura media en el cuartil más seco), BIO 10 (temperatura media en el cuartil más húmedo), BIO 15 (estacionalidad de precipitación) y BIO 16 (precipitación del cuartil más húmedo).

Una vez hecho eso, se generaron pseudoausencias con la librería de R `ecospat` para posteriormente unirlos con los registros obtenidos y generar los datos necesarios para el procesamiento de un modelo de distribución de especies (MDE), con los datos de presencia, las pseudoausencias. Una vez obtenidos los datos se realizó el MDE con el algoritmo Maxent haciendo diez repeticiones. Al tener el resultado de Maxent se generó la predicción de la distribución actual, con cada repetición generando diez mapas de predicción, por lo que fue necesario hacer una media de los diez mapas de distribución actual para obtener un único mapa. El procedimiento se realizó cinco veces, uno por cada género utilizado.

Para la predicción de la distribución futura se siguió el mismo procedimiento que la distribución actual, siendo la única diferencia las variables climáticas utilizadas. En este caso fueron utilizados los datos climáticos a futuro dos escenarios `ssp126` y `ssp585`, siendo la `ssp126` un escenario de cambio climático moderado en el cual se incluyen escenarios de mitigación, mientras que el `ssp585` pertenece a un escenario de cambio climático a futuro en el cual no se toman medidas de mitigación. Ambos escenarios fueron obtenidos en la plataforma de WorldClim 2.

Las librerías usadas fueron `ecospat`, `sf`, `maptools`, `raster`, `sp`, `dismo`, `rgeos`, `dismo`, `ENMeval`, `rJava`, `SSDM`, `usdm`, `sdm`, `plyr`, `rgdal`, `MigClim`, `spatialEco`, `biomod2`, `devtools`, `ENMtools`, `sdmvspecies` y `spatialLEco`.

3.5 Cartografía de comparación entre modelos y escenarios futuros y actuales

Para la generación de la cartografía comparativa entre los escenarios futuros y actual se utilizaron los resultados obtenidos de la distribución potencial actual y futura de los diferentes géneros de garrapatas en Norteamérica. En primer lugar, se re-escalaron los rasters para que tuvieran la misma resolución espacial debido a que el tamaño de la escala de ambos ráster era diferente. Posteriormente se generaron mapas binarios de la distribución actual y de los escenarios futuros con la herramienta `ecospat.binary.model` de la librería `ecospat`. Una vez obtenidos los cinco mapas binarios de cada género se hizo la comparación del mapa binario de la distribución actual y los cuatro mapas de la distribución futura para estimar el área que se mantiene, que se gana o se pierde en proyecciones climáticas futuras. La estimación de pérdida o ganancia se realizó con mapas binarios para evitar problemas de sobre

estimación al utilizar mapas de probabilidad. En este caso los paquetes utilizados fueron raster, rgdal, biomod2 y ecospat.

4. Resultados

4.1 Distribución Actual

El primer resultado obtenido en el trabajo fueron las distribuciones potenciales actuales de los cinco géneros de garrapatas (Figura 4). En general los cinco géneros de garrapatas tienen una amplia distribución en Norteamérica, aunque con patrones geográficos particulares. En el género *Ixodes* su distribución potencial tiene presencia en los tres países de Norteamérica, destacando su presencia en zonas aledañas al mar (este, oeste y sur de Norteamérica). El género se distribuye en bosques de coníferas (Estados Unidos y Canadá), planicies cálidas en las vertientes del Pacífico y Golfo (México), bosques templados caducifolios (Estados Unidos y Canadá), bosques perennifolios tropicales (México) y usos agrícolas (Estados Unidos y México).

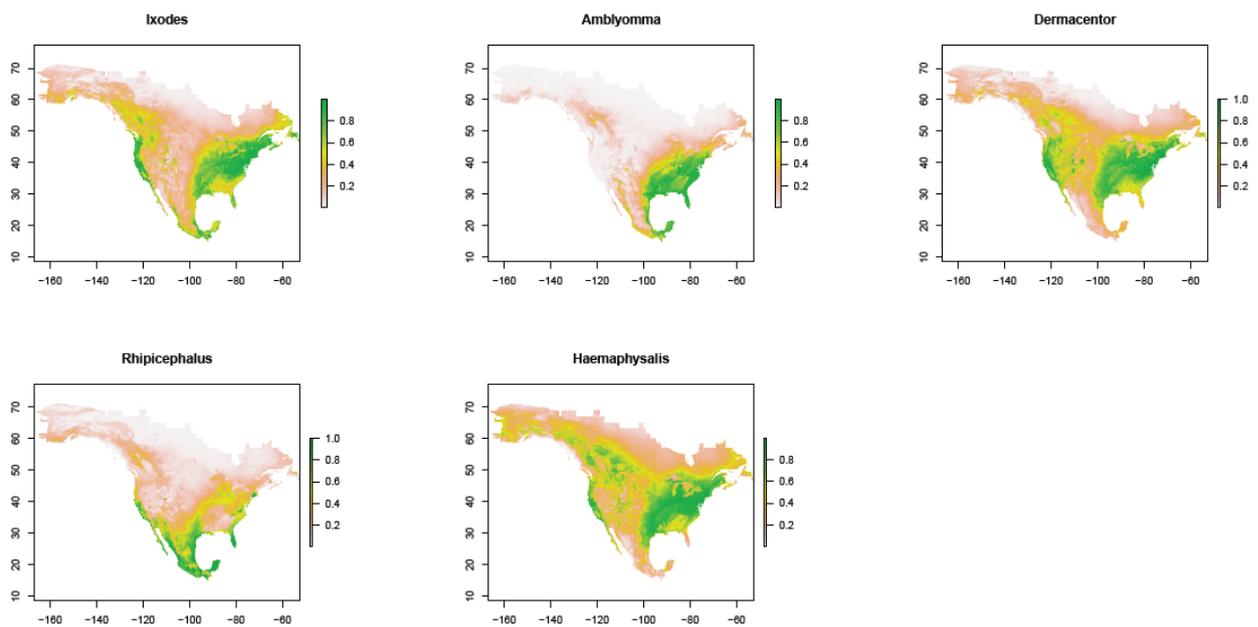


Figura 4. Distribución potencial actual de cinco géneros de garrapatas en Norteamérica. Los valores se indican de 0-1 como la probabilidad de presencia/ausencia de estos artrópodos en cada celda (0.1°).

El género *Amblyomma* tiene presencia en los tres países con una dominancia notable en el lado este de Norteamérica. En el caso de México está presente a lo largo de la costa de la vertiente del Golfo de México. El género *Amblyomma* se distribuye en bosques de coníferas templados (Estados Unidos), bosques caducifolios

templados (Estados Unidos), bosques perennifolios tropicales (México) y usos agrícolas (Estados Unidos y México).

El género *Dermacentor* tiene presencia en los tres países de Norteamérica (este y oeste), destacando su presencia en zonas aledañas al mar (Estados Unidos y Canadá) y restringida al extremo noroeste y noreste (México). El género *Dermacentor* se encuentra en bosques templados de coníferas (Estados Unidos y Canadá), los bosques templados caducifolios (Estados Unidos y Canadá) y usos agrícolas (Estados Unidos).

México es el país donde se distribuye ampliamente el género *Rhipicephalus*. Aunque Estados Unidos y Canadá también presentan una parte del área del nicho. Este género *Rhipicephalus* habita en bosques templados de coníferas (México y Estados Unidos), bosques templados caducifolios (Estados Unidos), usos agrícolas (México y Estados Unidos), bosques tropicales caducifolios (México) y matorrales tropicales (México). No obstante, la distribución cargada hacia el trópico sugiere que para esta especie la temperatura tiene una relación importante con el modelo.

El género *Haemaphysalis* tiene una amplia distribución en Estados Unidos, principalmente en su región centro oriental. En Canadá se predice su presencia en la región oeste, mientras que en México solamente en el noreste. El género *Haemaphysalis* se encuentra en bosques templados de coníferas (Estados Unidos y Canadá), los bosques templados caducifolios (Estados Unidos y Canadá), los bosques mixtos (Canadá), los usos agrícolas (Estados Unidos y México) y el matorral tropical (México).

4.2 Distribución Futura

En lo que concierne a los géneros *Ixodes*, *Dermacentor*, *Amblyomma* y *Haemaphysalis* se observa que la distribución potencial futura en comparación con su distribución actual se verá disminuida.

4.2.1 Ixodes

Las figuras mostradas a continuación (figura 5) corresponden a la distribución futura obtenida para el género *Ixodes* en el periodo 2081 – 2100 en los escenarios ssp116 y ssp585 en 2 diferentes modelos (IPSL- CM6A – LR y MIROC6), mientras que la figura 6 corresponde a mapas comparativos de los resultados presentes y futuros por cada escenario y modelos.

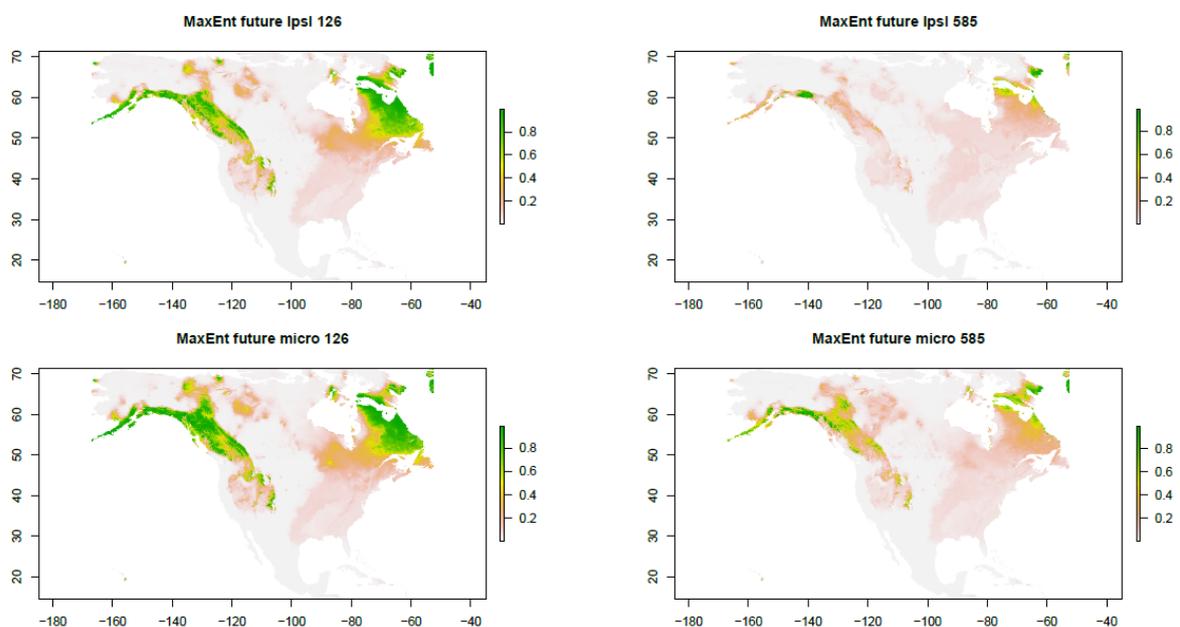


Figura 5. Distribución potencial para el año 2081 - 2100 del género *Ixodes* con base en los resultados climáticos de dos modelos globales y dos escenarios de emisiones contrastantes (SSP126 y SSP585). Los del lado izquierdo corresponden a ssp126 y los del lado derecho a 585. Los valores indican la probabilidad de presencia/ausencia de estos artrópodos para finales de siglo de acuerdo con los cambios esperados en el clima.

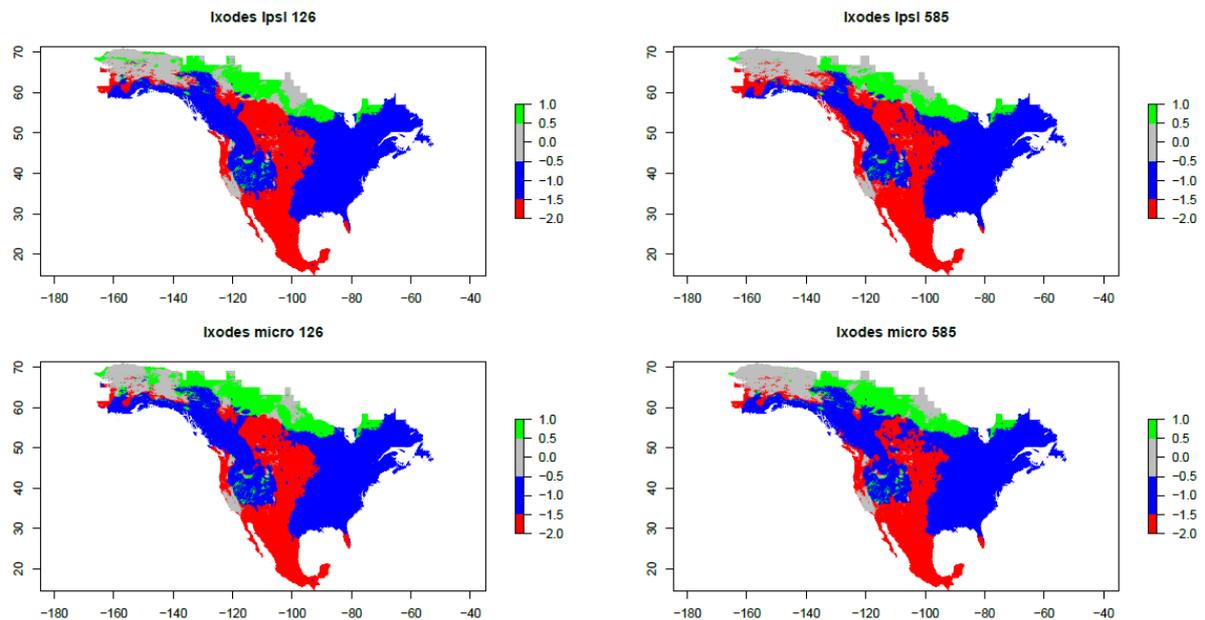


Figura 6. Mapas comparativos del cambio en la distribución en ambos modelos y escenarios en comparación con la distribución actual para el género *Ixodes*. Los del lado izquierdo corresponden a ssp126 y los del lado derecho a 585. Los colores indican: rojo- indica la pérdida de zona potencial de distribución de toda la zona de distribución actual, azul muestra la permanencia en la distribución y verde refiere a zonas nuevas de distribución

En la distribución del género *Ixodes* para el 2100 en ambos modelos, y se proyecta un desplazamiento de sus áreas de distribución hacia el norte de Canadá y EU con posible pérdida hacia el sur en México (Figura 5). Los mapas comparativos (Figura 6) se identifica que la distribución potencial futura tendrá una intensa reducción comparada a la distribución actual.

Los dos escenarios futuros ssp126 (Figura 6) coinciden casi en su totalidad, con un área de mayor contribución en las zonas este y oeste de Canadá y una casi nula presencia en los mismos puntos de Estados Unidos. En el caso de los dos escenarios ssp585 (Figura 6) existe una diferencia considerable en los modelos de distribución en el extremo noroeste de la proyección. El modelo MIROC ssp585 muestra un área potencial más grande a diferencia del modelo IPSL ssp585. Otras diferencias notables entre ambos escenarios es la cobertura espacial del nicho en las zonas noreste y oeste de Canadá y una pequeña región de Estados Unidos.

4.2.2 Dermacentor

Las figuras mostradas a continuación (figura 7) corresponden a la distribución futura obtenida para el género *Dermacentor* en el periodo 2081 – 2100 en los escenarios ssp116 y ssp585 en 2 diferentes modelos (IPSL- CM6A – LR y MIROC6), mientras que la figura 8 corresponde a mapas comparativos de los resultados presentes y futuros por cada escenario y modelos.

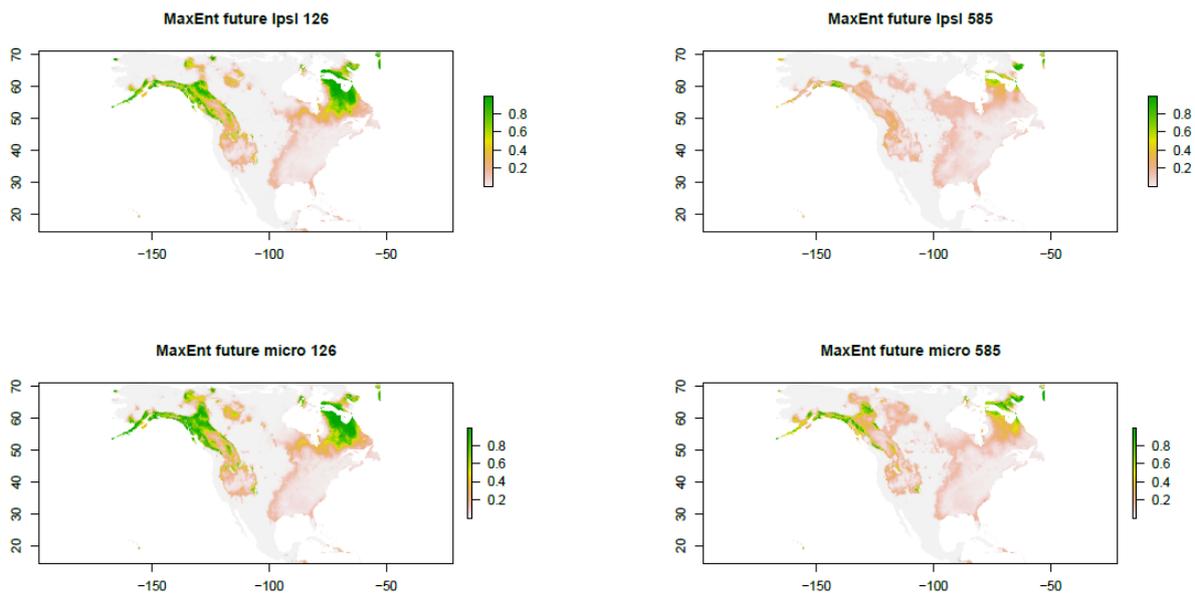


Figura 7. Distribución potencial para el año 2100 del género *Dermacentor* con base a los resultados climáticos de dos modelos globales y en dos escenarios de emisiones contrastantes (SSP126 y SSP585). Los del lado izquierdo corresponden a ssp126 y los del lado derecho a 585. Los valores indican la probabilidad de presencia/ausencia de estos artrópodos para finales de siglo de acuerdo con los cambios esperados en el clima.

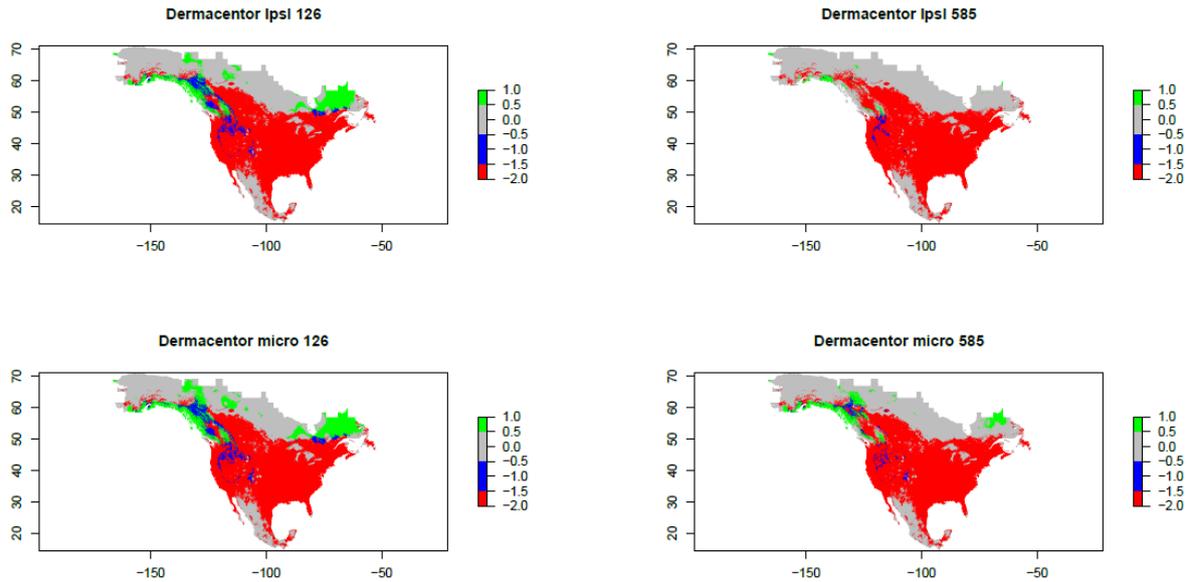


Figura 8. Mapas comparativos del cambio en la distribución en ambos modelos y escenarios en comparación con la distribución actual para el género *Dermacentor*. Los del lado izquierdo corresponden a ssp126 y los del lado derecho a 585. Los colores indican: rojo- indica la pérdida potencial de toda la zona de distribución actual, azul muestra la permanencia en la distribución y verde refiere a zonas nuevas de distribución.

Al igual que el género *Ixodes* (Figura 5), la distribución futura (2081 - 2100) del género *Dermacentor* en ambos modelos y escenarios implica un desplazamiento hacia el norte de Norteamérica (Figura 7). Los mapas comparativos (Figura 8) indican que la distribución actual tiene una fuerte reducción

En los modelos de ambos escenarios ssp126 (Figura 8) hay coincidencia en la presencia del género *Dermacentor* en las zonas este y oeste de Canadá. Sin embargo en el caso del modelo MIROC 126 se puede observar que hay un ligero incremento en la presencia de la zona noroeste. En el escenario ssp585 (Figura 8) hay una diferencia notoria en ambas zonas, siendo el modelo MIROC ssp585 el que predice un área de mayor extensión a diferencia del modelo IPSL ssp585. Las diferencias más notables entre ambos escenarios es el área de distribución potencial en las zonas noreste y oeste de Canadá. En Estados Unidos independientemente del escenario queda de la misma manera. No obstante, en los modelos futuros, es evidente que el cambio climático podría tener un efecto reductor sobre el área de distribución potencial de este género, en la mayor parte del territorio norteamericano.

4.2.3 Amblyomma

Las figuras mostradas a continuación (figura 9) corresponden a la distribución futura obtenida para el género *Amblyomma* en el periodo 2081 – 2100 en los escenarios ssp116 y ssp585 en 2 diferentes modelos (IPSL- CM6A – LR y MIROC6), mientras que la figura 10 corresponde a mapas comparativos de los resultados presentes y futuros por cada escenario y modelos.

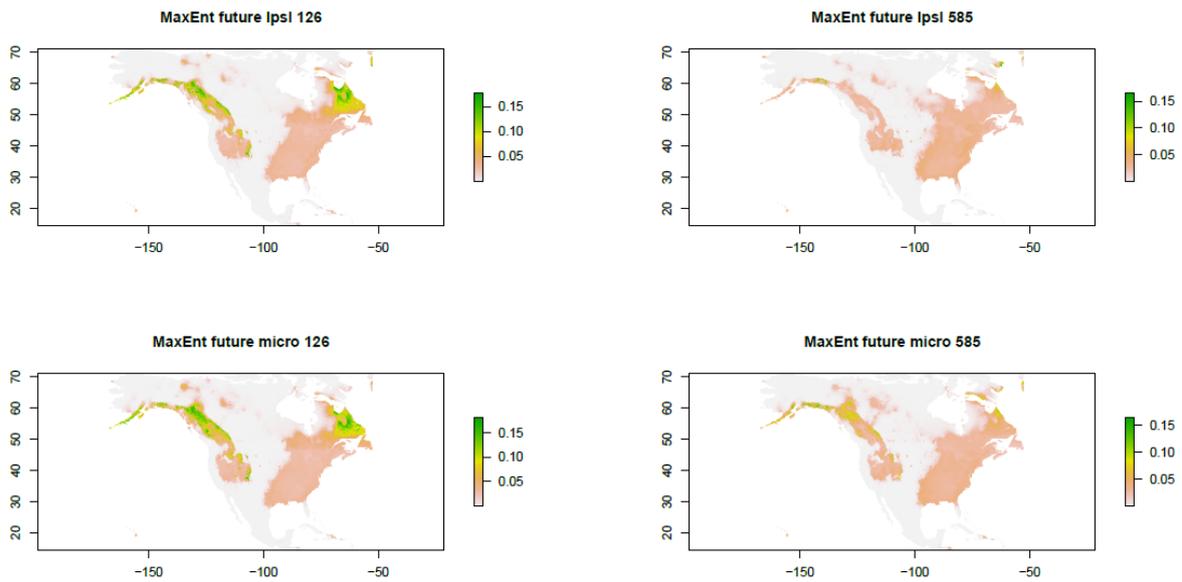


Figura 9. Distribución potencial para el año 2100 del género *Amblyomma* con base a los resultados climáticos de dos modelos globales y dos escenarios de emisiones contrastantes (SSP126 y SSP585). Los del lado izquierdo corresponden a ssp126 y los del lado derecho a 585. Los valores indican la probabilidad de presencia/ausencia de estos artrópodos para finales de siglo de acuerdo con los cambios esperados en el clima.

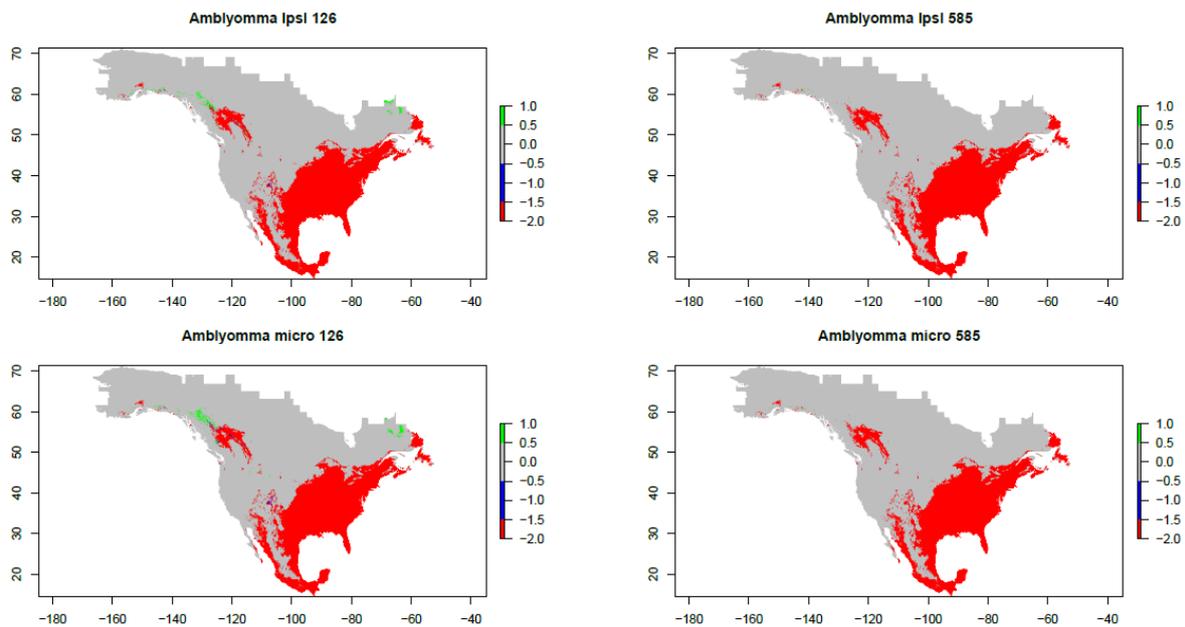


Figura 10. Mapas comparativos del cambio en la distribución en ambos modelos y escenarios en comparación con la distribución actual para el género *Amblyomma*. Los del lado izquierdo corresponden a ssp126 y los del lado derecho a 585. Los colores indican: rojo- indica la pérdida potencial de toda la zona de distribución actual, azul muestra la permanencia en la distribución y verde refiere a zonas nuevas de distribución.

En el género *Amblyomma* se sugiere un desplazamiento hacia el norte de su actual área de distribución en Norteamérica en escenarios futuros (Figura 9). Sin embargo, pese al desplazamiento existe pérdida en la cobertura espacial del nicho (Figura 4). Los mapas comparativos (Figura 10) nos muestran que la distribución potencial futura en comparación a su distribución actual se ve fuertemente reducida.

Para los escenarios ssp126 (Figura 10) de ambos modelos hay una diferencia mínima en la presencia del lado noroeste de Canadá. En ambos mapas del escenario ssp585 (Figura 9) aparentemente no hay diferencias.

Las diferencias más notables entre ambos escenarios son la el área de nicho potencial en las zonas noreste y oeste de Canadá. En Estados Unidos independientemente del escenario no hay cambios aparentes.

4.2.4 Haemaphysalis

Las figuras mostradas a continuación (figura 11) corresponden a la distribución futura obtenida para el género *Haemaphysalis* en el periodo 2081 – 2100 en los escenarios ssp116 y ssp585 en 2 diferentes modelos (IPSL- CM6A – LR y MIROC6), mientras que la figura 12 corresponde a mapas comparativos de los resultados presentes y futuros por cada escenario y modelos.

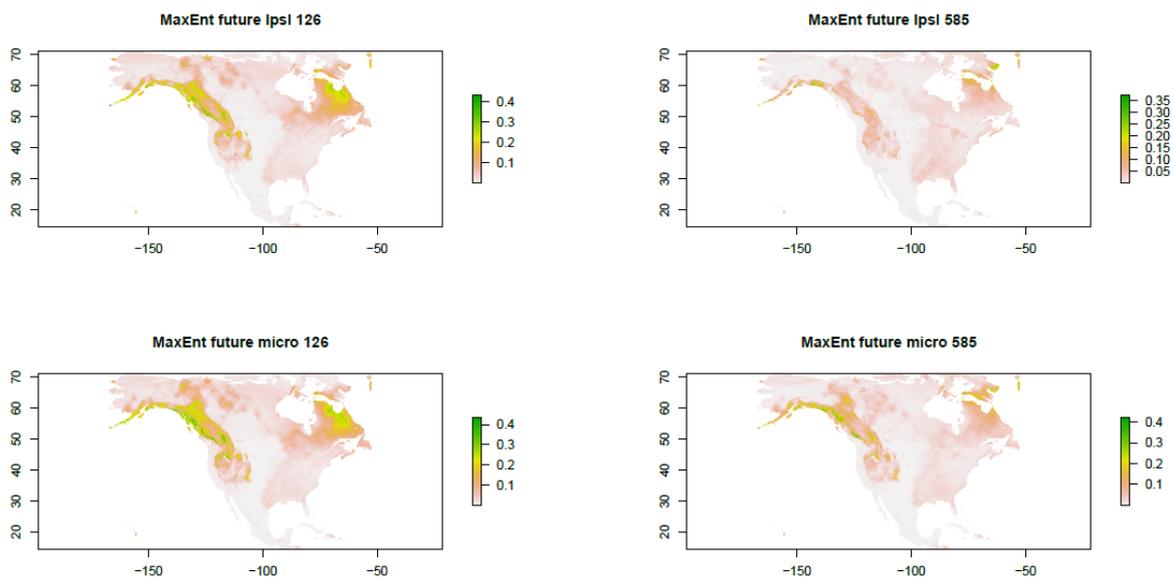


Figura 11. Distribución potencial para el año 2100 del género *Haemaphysalis* con base en los resultados climáticos de dos modelos globales y dos escenarios de emisiones contrastantes (SSP126 y SSP585). Los del lado izquierdo corresponden a ssp126 y los del lado derecho a 585. Los valores indican la probabilidad de presencia/ausencia de estos artrópodos para finales de siglo de acuerdo con los cambios esperados en el clima.

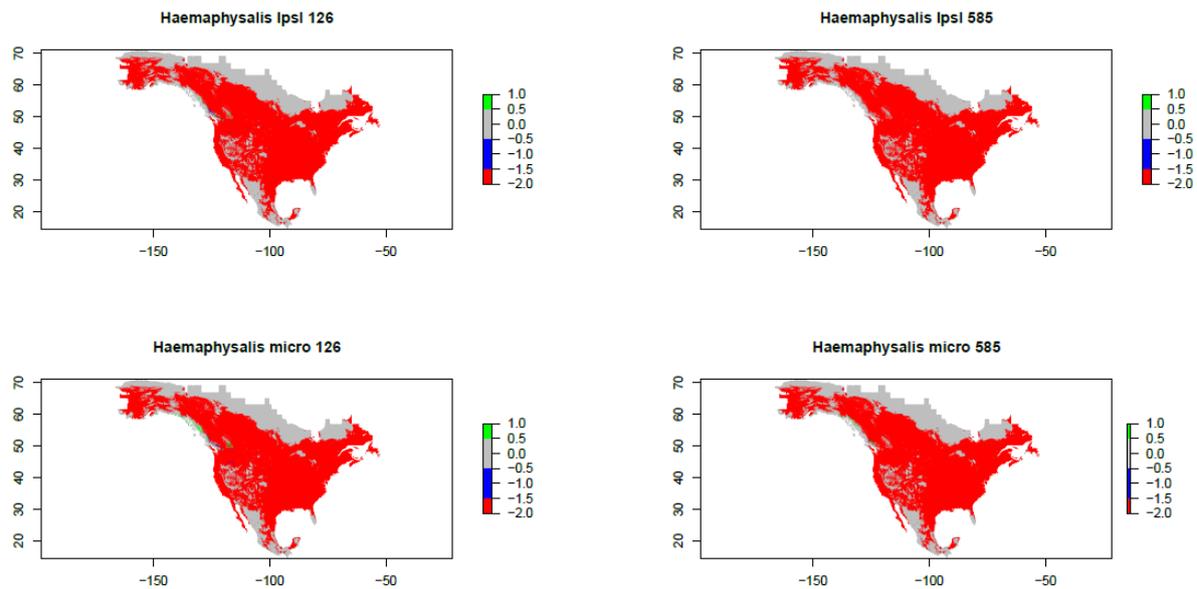


Figura 12. Mapas comparativos en la distribución en ambos modelos y escenarios en comparación con la distribución actual para el género *Haemaphysalis*. Los del lado izquierdo corresponden a ssp126 y los del lado derecho a 585. Los colores indican: rojo- indica la pérdida potencial de toda la zona de distribución actual, azul muestra la permanencia en la distribución y verde refiere a zonas nuevas de distribución.

El género *Haemaphysalis*, sólo tuvo una reducción en su área de distribución potencial en escenarios futuros (Figura 11). La distribución potencial futura en comparación con la actual prácticamente desaparece de acuerdo con las condiciones climáticas y a los mapas comparativos (Figura 12).

En los escenarios ssp126 de ambos modelos (Figura 12) no parece haber diferencias. En el caso del escenario ssp585 (Figura 12) hay una diferencia en la presencia de la zona noroeste de Canadá en el modelo MIROC ssp585.

Las discrepancias más notables entre ambos escenarios son la cobertura espacial del nicho en las zonas noreste y oeste de Canadá. En Estados Unidos independientemente del escenario queda de la misma manera.

4.2.5 Rhipicephalus

Las figuras mostradas a continuación (figura 13) corresponden a la distribución futura obtenida para el género *Rhipicephalus* en el periodo 2081 – 2100 en los escenarios ssp116 y ssp585 en 2 diferentes modelos (IPSL- CM6A – LR y MIROC6), mientras que la figura 14 corresponde a mapas comparativos de los resultados presentes y futuros por cada escenario y modelos.

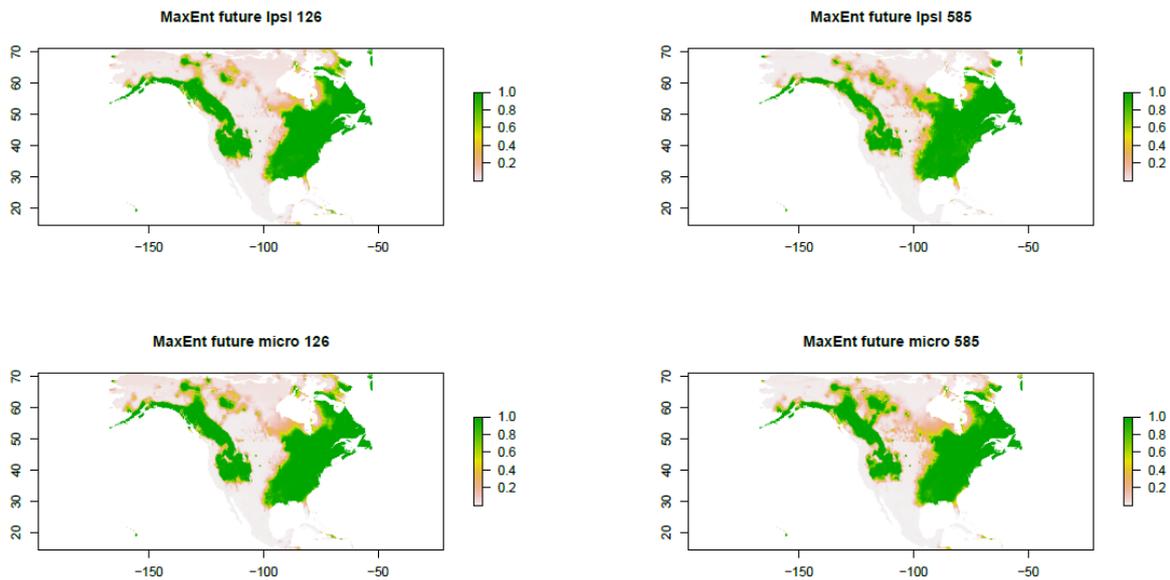


Figura 13. Distribución potencial para el año 2100 del género *Rhipicephalus* con base en los resultados climáticos de dos modelos globales y en dos escenarios de emisiones contrastantes (SSP126 y SSP585). Los del lado izquierdo corresponden a ssp126 y los del lado derecho a 585. Los valores indican la probabilidad de presencia/ausencia de estos artrópodos para finales de siglo de acuerdo con los cambios esperados en el clima.

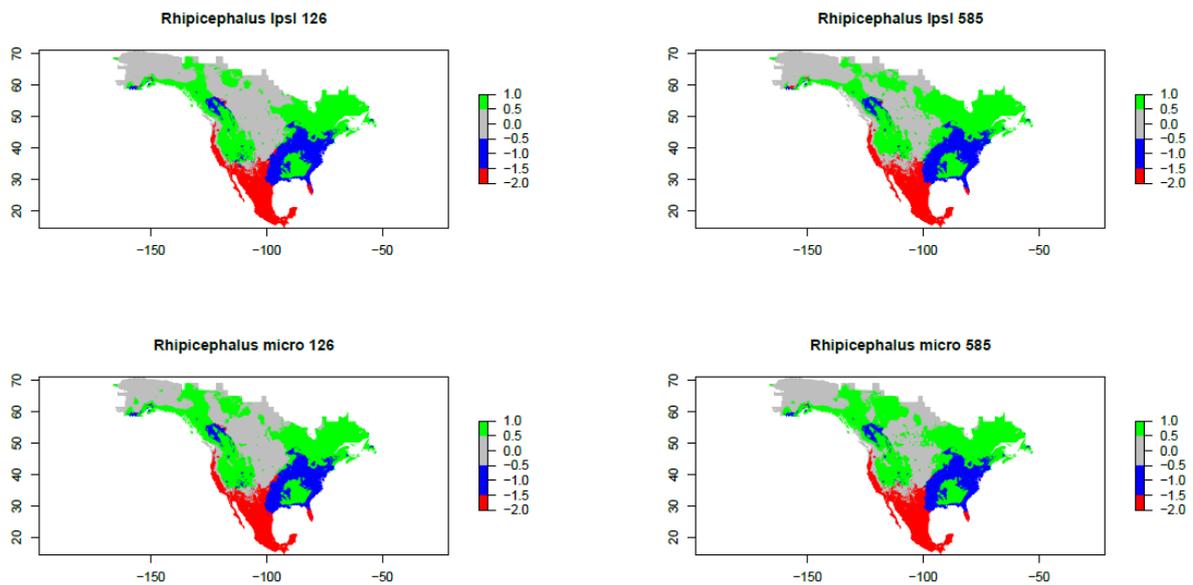


Figura 14. Mapas comparativos en la distribución en ambos modelos y escenarios en comparación con la distribución actual para el género *Rhipicephalus*. Los del lado izquierdo corresponden a ssp126 y los del lado derecho a 585. Los colores indican: rojo- indica la pérdida potencial de toda la zona de distribución actual, azul muestra la permanencia en la distribución y verde refiere a zonas nuevas de distribución.

Al igual que los géneros anteriores (Figuras 4 ,6 ,8 y 10) los modelos sugieren que, *Rhipicephalus* se tendría que desplazar hacia el norte de Norteamérica (Figura 13). En los mapas comparativos en el escenario ssp126 de ambos modelos solo presenta una pequeña diferencia en la parte noroeste (Figura 14). Además, se puede observar un incremento notable en el área potencial de distribución tanto en Estados Unidos como Canadá. En el escenario ssp585 (Figura 14) los mapas obtenidos coinciden en su mayoría, la única diferencia es el incremento de su distribución en la parte central de Canadá y Estados Unidos en el modelo IPSL 585. No hay diferencias evidentes entre escenarios (ssp126 y ssp585) (Figura 14).

5. Discusión

5.1 Cambios modelados en la distribución potencial de garrapatas en el siglo XXI

El patrón que recurrente en la distribución de los géneros de garrapatas en los escenarios futuros es el posible desplazamiento hacia el norte de su actual área de distribución, independientemente del género modelado. Otro patrón importante en las proyecciones de las distribuciones futuras se encuentra en la reducción de las áreas de distribución de cuatro de los géneros cinco de garrapatas analizadas (*Ixodes*, *Dermacentor*, *Amblyomma* y *Haemaphysalis*) siendo los géneros *Amblyomma* y *Haemaphysalis* los más afectados debido a que aparentemente se encontrarían casi desaparecidos.

Estos resultados son consistentes con lo observado por otros estudios. Raghavan et al. (2019) modela el cambio en la distribución a futuro de la especie *Amblyomma americanum* en Norteamérica, mediante el algoritmo MaxEnt y los datos bioclimáticos de WorldClim 1.4. En dicho trabajo se muestra un movimiento en la zona norte de Estados Unidos y Canadá (figura 15). Este estudio también deja en claro que hay una pérdida en las áreas potenciales de distribución en México y en la zona sur de Estados Unidos debido ocasionados por el cambio climático y el crecimiento demográfico de los siervos de cola blanca.

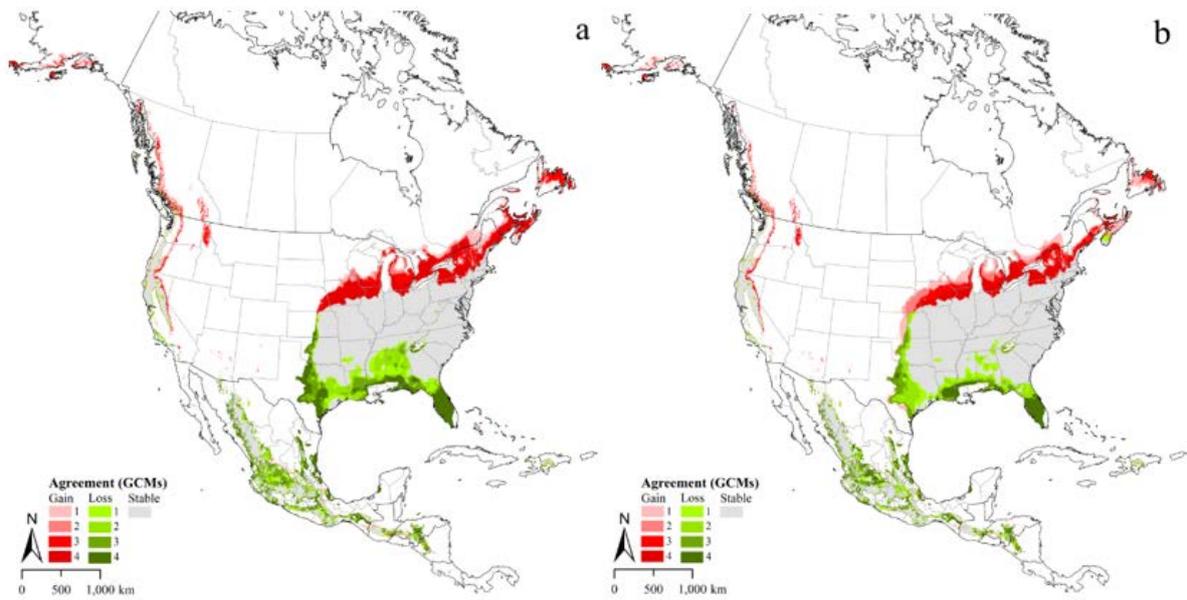


Figura 15. Mapas distribución futura para *Amblyomma americanum* en Norteamérica en los escenarios RCP 4.5 (a) y RCP 8.5 (b) (Raghavan et al. 2019).

Un caso particular es el género *Rhipicephalus*, que además de seguir los mismos patrones de desplazamiento hacia zonas norteñas, pierde toda su distribución potencial en México y su presencia en las áreas cercanas a las costas noreste y noreste de Canadá y Estados Unidos, presentando un gran incremento en la zona norte de ambos países. Lo anterior también ha sido observado en un estudio realizado por Marques et al. (2020). Los autores realizaron un análisis para *Rhipicephalus MIROCplus* a escala mundial con las variables bioclimáticas de WorldClim 1.4 para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 en los periodos de 2050 y 2070 y se observó que el área de distribución a futuro es amplia en el extremo norte a nivel mundial en ambos escenarios y periodos utilizados (figura 16).

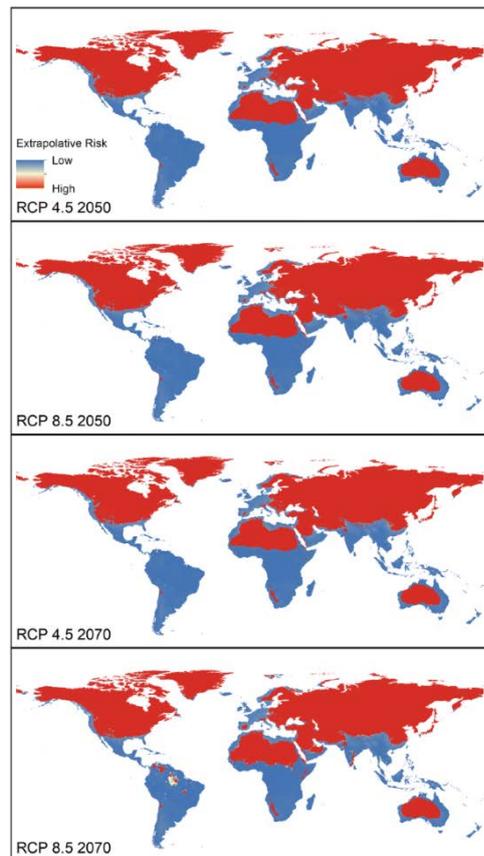


Figura 16. Mapas de área de en riesgo de extrapolación de las condiciones climáticas actuales a futuras (Marques et al. 2020).

Estos resultados también son consistentes con los patrones de cambio en la distribución de especies de insectos transmisoras de enfermedades del trópico. Un ejemplo de esto lo da el artículo de Fischer et. al (2013) en el que se hizo una proyección de la distribución a futuro en Europa de los años 2013 al 2100 para los mosquitos transmisores del Chikungunya y se pudo observar que además de haber un incremento en las zonas rojas actuales, se presenta un incremento en el área de distribución hacia el norte del área estudiada.

5.2 Implicaciones en la transmisión de enfermedades

La repercusión más importante del cambio en la distribución potencial de las garrapatas es un aumento en los casos de enfermedades transmitidas por dichos quelícerados en las zonas donde su distribución aumentará en el futuro. De acuerdo con los resultados obtenidos en la temporalidad de 2081 - 2100, las zonas con mayor

riesgo de aumento de garrapatas estarían en la parte noreste y noroeste de Estados Unidos y Canadá para los géneros de *Amblyomma*, *Dermacentor*, *Haemaphysalis* e *Ixodes*, mientras que *Rhipicephalus* además de tener presencia en las zonas mencionadas anteriormente, también se distribuirá a lo largo de las planicies del este y en el centro oeste de Estados Unidos.

Esto es consistente con patrones encontrados recientemente, por ejemplo, en los últimos años ha habido un incremento en los casos registrados de la enfermedad de Lyme en Estados Unidos (Frank. Curriero et al, 2021) Otro ejemplo en Estados Unidos es la isla de Rhode, donde a partir del 2012 se ha presenciado un incremento en los casos registrados de distintas enfermedades transmitidas por garrapatas como Lyme, babesiosis, anaplasmosis, ehrlichiosis y el síndrome de alpha-gal (Ginsberg et al. 2013).

Anualmente se ha registrado un incremento en los reportes de rickettsiosis en Norteamérica asociados principalmente a la mordedura de garrapatas, aunque también puede ser transmitida por otros vectores como pulgas, piojos y ácaros (Hardstone. et al, 2018).

En México en una publicación realizada por la secretaría de salud (2016) se implementó un sistema de vigilancia epidemiológica para rickettsiosis con la finalidad de obtener información que ayuden a la mitigación o eliminen los riesgos de salud, esto sucedió debido a que se presentó un incremento en los casos de Rickettsiosis principalmente en la zona norte de México.

Enfermedades ocasionadas por *Rickettsia* y *Borrelia* cuyo su principal transmisor es *Amblyomma maculatum*, especie ampliamente distribuida en varios lugares desde América del Sur hasta las costas del Golfo de México y el mar Caribe, incluyendo a América Central. En las últimas décadas se ha registrado un aumento en su distribución, principalmente hacia estados de la parte norte de Estados Unidos como Nueva York, Pensilvania y Nueva Jersey. Además de los factores climáticos favorables se cree que la expansión se ha visto favorecida por el movimiento de aves migratorias (Sonenshine, 2018).

En Canadá *Dermacentor variabilis* transmisora de *Rickettsia* se ha expandido del norte de Estados Unidos a la parte sur de Canadá en lugares como Ontario, Saskatchewan, Manitoba y Nueva Escocia, aunque las garrapatas por lo general no

sobreviven a temperaturas menores a 0°C, se determinó que en promedio el 20% de ellas logró sobrevivir toda la temporada de invierno (Sonenshine, 2018).

El incremento de los casos registrados de la enfermedad de Lyme a través de los años y su desplazamiento hacia el noreste y noroeste de Estados Unidos y Canadá puede ser observado en la plataforma <https://www.hopkinslymetracker.org/overview/>. En Estados Unidos en el año 2000 se presentaron 17730 casos de Lyme, en 2005 se presentaron 23305, para 2010 ascendió a 30158 y en 2018 se presentaron 33666 casos registrados de la enfermedad de Lyme, con estas imágenes se puede apreciar que el incremento de casos esta sucediendo en la parte norte del país (figura 17).

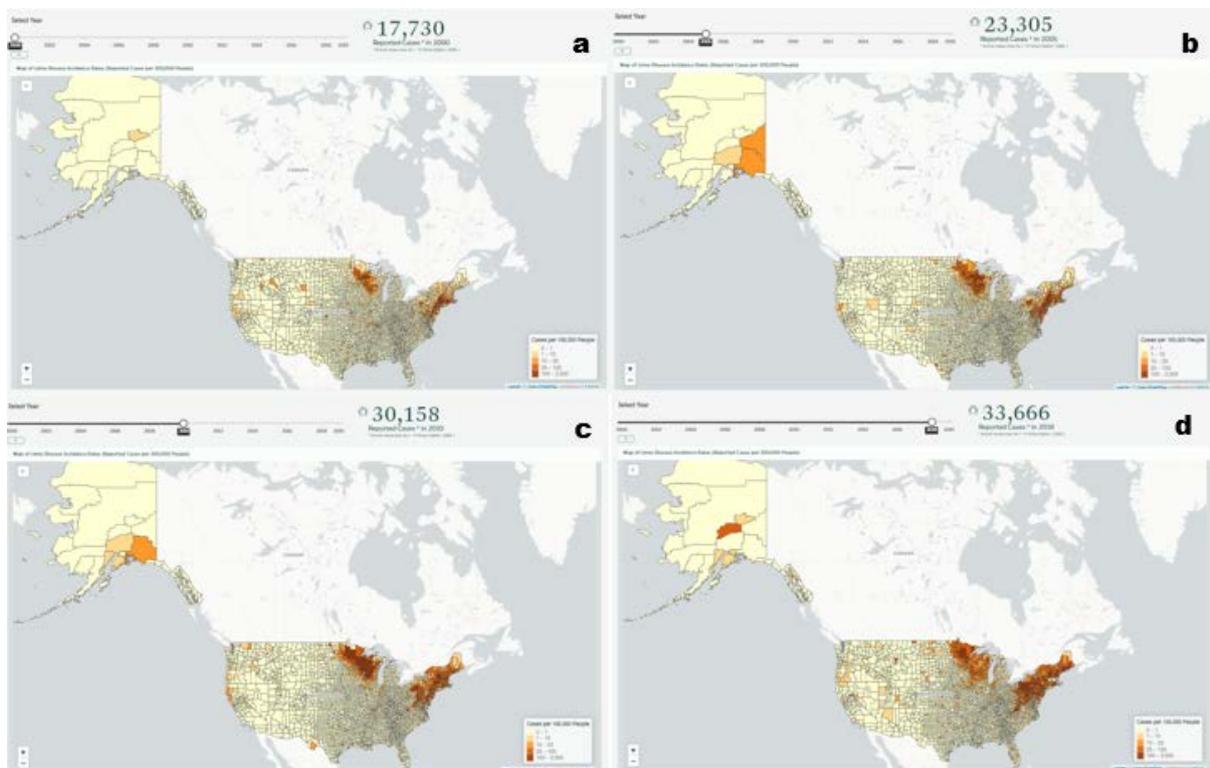


Figura 17. Mapas de casos registrados para la enfermedad de Lyme en Estados Unidos en diferentes años, 2000 (a), 2005 (b), 2010 (c) y 2018 (d). Obtenido de: <https://www.hopkinslymetracker.org/overview/>

En el caso de Canadá para el año 2009 se presentaron 144 casos de Lyme, en 2013 se presentaron 682, para 2016 ascendió a 992 y en 2019 se presentaron 2639 casos registrados de la enfermedad de Lyme. En Canadá se puede observar que las partes

este y oeste son en las que presencian el incremento de las enfermedades (figura 18).



Figura 18. Mapas de casos registrados para la enfermedad de Lyme en Canadá en diferentes años, 2009 (a), 2013 (b), 2016 (c) y 2019 (d). Obtenido de: <https://www.hopkinslymetracker.org/overview/>

5.3 Incertidumbre en la modelación

Cuando se trabaja con un modelo matemático existen al menos tres niveles de incertidumbre que deben considerarse: el estructural (propia de la forma del modelo), la paramétrica (los datos con que se alimenta) y la del forzamiento (por ejemplo los datos climáticos). Estos tres niveles interactúan en este trabajo y es importante considerarlos para comprender las limitaciones del estudio. Las variables que se toman en cuenta no suelen abordar todos los ejes que inciden en el tema, esto se debe a la complejidad que suele significar y por ello existen limitantes a la hora de realizarlo.

En primer lugar se encuentra la incertidumbre estructural. En ese sentido, aunque el algoritmo de Maxent es uno de los más utilizados para la generación de modelos de distribución potencial de especies, no es el único algoritmo capaz de generar este tipo de resultados. Por ejemplo, en el artículo de Ortega-Huerta et al (2008) se utilizan diferentes algoritmos como BioMapper, Maxent, Domain, FloraMap, GARP y Weights of evidence, para modelar el nicho ecológico de diez especies de aves en México. En los mapas que presentan de una especie se observa que aunque los algoritmos tienen ciertas zonas en las que coinciden, cada uno da resultados diferentes, (Figura 19). De acuerdo con el artículo los algoritmos que se acercan al área de distribución más cercana a la realidad son Maxent y GARP, mientras que los otros presentan diversas zonas de error, ya sea por un sobre estimar o subestimar el área de distribución real. En ese sentido, el obtener modelos con diferentes algoritmos podría robustecer los alcances de la investigación. Además, resulta primordial realizar una comprobación en campo y evaluar la veracidad de los modelos obtenidos con el algoritmo de Maxent, o bien realizar una evaluación con datos indirectos utilizando los registros de incidencia de enfermedades asociadas a los diferentes géneros de garrapatas.

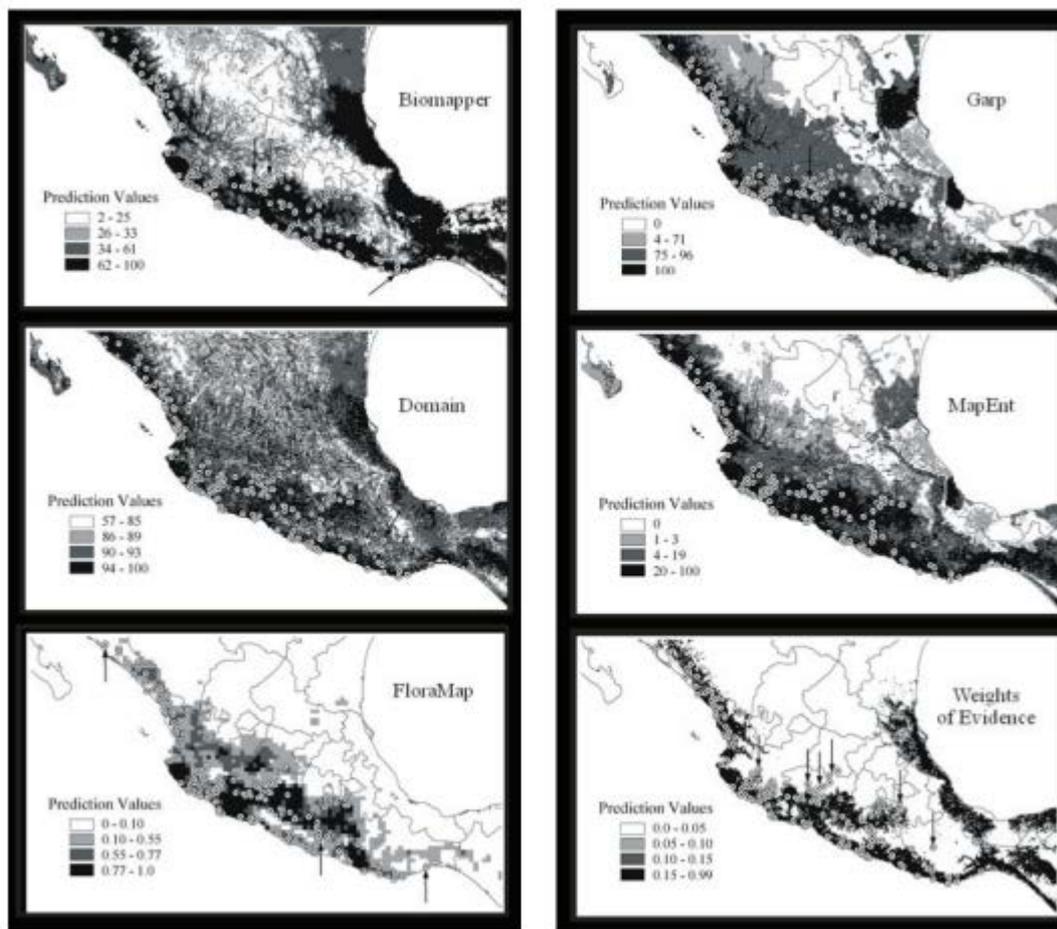


Figura 19 Área potencial de distribución para la especie *Melanerpes chrysogenys* con seis algoritmos diferentes (Ortega-Huerta M et al 2008).

En segundo lugar se encuentra la incertidumbre paramétrica, asociada a los datos usados para alimentar la distribución actual de las garrapatas. En el trabajo se utilizaron los datos de la plataforma GBIF, pero existen diversas bases de datos ya sea de universidades o del sector salud, con las que se podrían complementar los datos para tener una mejor zonificación de la distribución de las especies utilizadas en modelos actuales como en las proyecciones futuras.

Finalmente se encuentra la incertidumbre generada por el forzamiento climático. En ese sentido se eligieron dos modelos y dos escenarios, pero sería importante utilizar un mayor número de escenarios para poder tener una mejor representación de la movilidad de las especies en diferentes escenarios temporales y no solo el resultado del escenario 2081 a 2100. En el caso de los escenarios también sería crucial utilizar un mayor número de modelos dado que los resultados pueden variar un poco de modelo a modelo.

5.4 Limitaciones del estudio e investigación a futuro

El uso de herramientas computacionales como lo puede ser MaxEnt en la plataforma de R, se ve directamente influenciado por los datos que se proporcionan para el procesamiento de los datos. Es por ello que existen diversas limitantes a la hora de realizar predicciones u otro tipo de modelos estadísticos, debido a que los resultados obtenidos van a tomar en cuenta únicamente los datos que se tengan para la realización de los modelos. Esto aún que puede o no tener gran peso puesto a que el tipo manejo y procesamiento de estos datos es importante, el tener un número mayor de datos sería favorable.

Una vez dicho lo anterior, sería fundamental el incremento de los datos de presencia de garrapatas, ya que para esta predicción solo fueron utilizados los datos obtenidos mediante la plataforma de GBIF dado que esta posee información de diversas bases de datos pero no posee todos los datos posiblemente disponibles, además la diferencia entre el número de registros obtenidos para cada género fue muy variable.

Un ejemplo de esto se ve en los datos obtenidos en la plataforma GBIF, ya que a la hora de obtener los registros de garrapatas disponibles para Norte América, para el género *Boophilus* y *Aponomma* (Géneros no analizados) se obtuvieron 18 y dos datos respectivamente, mientras que para que los géneros *Dermacentor* e *Ixodes* se dispuso de 6226 y 5052 registros de 11 y 39 especies respectivamente.

Otro factor importante a tener en cuenta son las temporalidades anteriores a los años 2081 - 2100, ya que de acuerdo con Zhang et al (2022) las áreas potenciales de distribución al menos para el género *Ixodes* con los datos bioclimáticos de los periodos de 2021–2040 y 2041–2060 se ve un incremento en el área de distribución, mientras que en los periodos de 2061–2080 y 2081–2100 hay una disminución en el área de distribución potencial.

Aunque solo se tomaron en cuenta la ubicación y las variables climáticas es necesario tomar en cuenta la implicación que tienen otro tipo de variables en la determinación del nicho potencial de cada género o especie de garrapatas. De acuerdo con Medlock et al (2013) aunque las variables bioclimáticas son un factor importante a la hora de realizar una definición del nicho ecológico de las garrapatas,

se puede suelen presentar ciertas regiones en las que el factor del cambio de uso de suelo puede tener un peso mayor en la definición del nicho.

Por ejemplo, en un estudio realizado por Rosá. et al (2018) se tomaron en cuenta las variables bioclimáticas y varias categorías de uso de suelo para la predicción de distribución de *Ixodes ricinus*. En este estudio. Identificaron que el conjunto de variables climáticas más el cambio de uso de suelo es importante para modelar la distribución de las garrapatas debido a que estas se han visto beneficiadas por los procesos de antropización, actividades socioeconómicas y, sobre todo, la presencia de animales domésticos o salvajes que proliferan en núcleos humanos.

En el caso de las garrapatas la presencia de un hospedero de sangre caliente (mamíferos o aves) son primordiales para su movilidad (Ostfeld, et al, 2014). Por esta razón para tener un acercamiento más certero en la delimitación de su nicho ecológico se debería también modelar la predicción del nicho ecológico de los mamíferos pequeños y medianos, reptiles, anfibios y aves que funcionan como hospederos (Llòria, 2002 y Castañeda et al, s.f).

Con base a todo lo anterior se sugiere que en investigaciones futuras, sería fundamental utilizar una mayor cantidad de registros de las especies analizadas, utilizar las diferentes temporalidades de las variables climáticas a futuro, agregar variables importantes para la definición del nicho como el cambio de uso de suelo y la presencia de los hospederos utilizados por las garrapatas.

6. Bibliografía

1. Adrion ER et al. (2015) Health Care Costs, Utilization and Patterns of Care following Lyme Disease. PLOS ONE 10(2): e0116767. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0116767>
2. Aubry. P & Geale. W. (2011). A review of bovine anaplasmosis. Transbound. Emerg. Dis. 58, 1–30. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1865-1682.2010.01173.x>.
3. Barclay. E (2008) Is climate change affecting dengue in the Americas?. Lancet. 371(9617), 0–974. doi:10.1016/s0140-6736(08)60435-3
4. Benavides. H & León. E (2007) Información Técnica Sobre Gases De Efecto Invernadero Y El Cambio Climático. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
5. Brooks, Nick. (2003). Vulnerability, Risk and Adaptation: A Conceptual Framework. Tyndall Centre for Climate Change Research, Working Paper No. 38.
6. Castañeda E & Velasco L (s.f) El Género Amblyomma (Acari: Ixodidae) en el Departamento de Caldas y su evaluación por Microscopía Electrónica de Barrido y Marcadores Moleculares.
7. Cerda J, et al. (2008). Cambio climático y enfermedades infecciosas: Un nuevo escenario epidemiológico. Revista chilena de infectología, 25(6), 447-452. <https://dx.doi.org/10.4067/S0716-10182008000600006>.
8. Chavaro M et. al (2008) Amenazas, riesgo, vulnerabilidad y adaptación frente al cambio climático. UNODC- Colombia Proyecto AD/COI/21.
9. CONABIO (s.f) El Sistema de Monitoreo del Cambio en la Cobertura de Suelo de América del Norte (NALCMS). Recuperado de: <https://www.biodiversidad.gob.mx/monitoreo/cobertura-suelo/baja-resolucion/NALCMS>
10. CONEVAL (2018) Medición de la Pobreza. Consejo Cacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social Recuperado de: <https://www.coneval.org.mx/Medicion/Paginas/PobrezalInicio.aspx>
11. Colunga-Salas P, et al. (2020) Lyme disease and relapsing fever in Mexico: An overview of human and wildlife infections. PLOS ONE 15(9): e0238496. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0238496>

12. Couzin J et al. (2019) Long-underfunded Lyme disease research gets an injection of money—and ideas. doi: 10.1126/science.aax7340
13. de la Fuente, Jose & Estrada-Peña, Agustín & Venzal, José & Kocan, Katherine & Sonenshine, Daniel. (2008). Overview: Ticks as vectors of pathogens that cause disease in humans and animals. *Frontiers in bioscience : a journal and virtual library*. 13. 6938-46. 10.2741/3200.
14. Fick, S.E. & R.J. Hijmans, 2017. Worldclim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0260122>
15. Frank C. Curriero. et al (2021). The Lyme and Tick Borne Disease Dashboard: A map-based resource to promote public health awareness and research collaboration. Recuperado de: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0260122#pone-0260122-g002>.
16. GBF (2021) Global Biodiversity Information Facility. Recuperado de: <https://www.gbif.org/>
17. Ginsberg HS, Couret J, Garrett J, Mather TN, LeBrun RA. Potential Effects of Climate Change on Tick-borne Diseases in Rhode Island. *R I Med J* (2013). 2021 Nov 1;104(9):29-33. PMID: 34705904.
18. Githeko. A et al. (2000) Climate change and vector-borne diseases: a regional analysis. *Bulletin of the World Health Organization : the International Journal of Public Health* 2000 ; 78(9) : 1136-1147.
19. Gordillo. M et al. (2010) Enfermedad de Lyme. Experiencia en niños mexicanos. *Boletín Médico del Hospital Infantil de México* vol.67 no.2. Recuperado de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-11462010000200010
20. Haeberli, Wilfried & Beniston, M.. (1998). Climate Change and its Impacts on Glaciers and Permafrost in the Alps. *Ambio*. 27. 258-265.
21. Hardstone Yoshimizu M, Billeter SA. Suspected and Confirmed Vector-Borne Rickettsioses of North America Associated with Human Diseases. *Trop Med Infect Dis*. 2018 Jan 3;3(1):2. doi: 10.3390/tropicalmed3010002. PMID: 30274401; PMCID: PMC6136625.

22. Hofhuis A, van der Giessen J W, Borgsteede F, Wielinga P R, Notermans D W, van Pelt W. (2006). Lyme borreliosis in the Netherlands: strong increase in GP consultations and hospital admissions in past 10 years. <https://doi.org/10.2807/esw.11.25.02978-en>
23. H-W. Pfister; et al. (1994). Lyme borreliosis: basic science and clinical aspects. *The Lancet*. 343(8904), 1013–1016. doi:10.1016/s0140-6736(94)90130-9.
24. IDEAM (2009) Glosario Meteorológico. Instituto De Hidrologia Meteorologia Y Estudios Ambientales. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/279895071_Climate_Change_and_its_Impacts_on_Glaciers_and_Permafrost_in_the_Alps.
25. IPCC (2001) A Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change represents the formally agreed statement of the IPCC concerning climate change mitigation. [Banuri, T., Barker, T., Bashmakov, I., Blok, K., Bouille, D., Christ, R., Davidson, O., Edmonds, J., Gregory, K., Grubb, M., Halsnaes, K., Heller, T., Hourcade, J.-C., Jepma, C., Kauppi, P., Markandya, A., Metz, B., Moomaw, W., Moreira, J. R., Morita, T., Nakicenovic, N., Price, L., Richels, R., Robinson, J., Rogner, H. H., Sathaye, J., Sedjo, R., Shukla, P., Srivastava, L., Swart, R., Toth, F., & Weyant, J]. IPCC. Recuperado de: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGIII_TAR_full_report.pdf
26. IPCC (2013) Cambio Climático 2013. Bases físicas Resumen para responsables de políticas. [Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M. M. B., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., & Midgley, P. M]. IPCC. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SPM_brochure_es.pdf.
27. IPCC (2014) Climate Change 2014. Synthesis Report Summary for Policymakers. IPCC. Cambio climático. Recuperado de: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5_SYR_FINAL_SPM.pdf
28. IPCC, (2018). Glosario. Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y

- Nueva York, NY. Recuperado de: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/WGI_AR5_glossary_ES.pdf
29. Katherine. M et. (2007). Global Climate Change and Children's Health. PEDIATRICS, 120(5), e1359–e1367. doi:10.1542/peds.2007-2646
 30. Kuehn, Bridget M. (2013). CDC Estimates 300 000 US Cases of Lyme Disease Annually. JAMA, 310(11), 1110–. doi:10.1001/jama.2013.278331
 31. Lindgren. E & Gustafson. R (2001). Tick-borne encephalitis in Sweden and climate change. The Lancet. 358(9275), 0–18. doi:10.1016/s0140-6736(00)05250-8
 32. : Lindsay LR. Present state of common vector-borne diseases in Canada. Can Comm Dis Rep 2016;42:200-1. <https://doi.org/10.14745/ccdr.v42i10a03>
 33. Lugo Hubp. (1989). Diccionario geomorfológico, Instituto de Geografía, UNAM, 337 p. Recuperado de: <http://marina.geologia.uson.mx/academicos/iminjare/Geomorfologia/REFERENCIAS/DICCIONARIO%20GEOMORFOLOGICO.pdf>.
 34. Llòria M. (2002). Garrapatas.Parásitos animales. Recuperado de: <https://www.elsevier.es/es-revista-farmacia-profesional-3-articulo-garrapatas-parasitos-animales-13031767#:~:text=La%20Ixodes%20ricinus%20y%20la%20Rhipicephalus%20sanguineus%20son%20de%20tres,parasitan%C2%BB%20a%20su%20correspondiente%20hospedador.>
 35. Magaña. V (2007) El cambio climático global: comprender el problema. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. Recuperado de: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/437/magana1.html>
 36. Mantke. D et., al (2008). A survey on cases of tick-borne encephalitis in European countries. Euro Surveillance : Bulletin Européen Sur Les Maladies Transmissibles = European Communicable Disease Bulletin. European Centre for Disease Prevention and Control. <https://doi.org/10.2807/ese.13.17.18848-en>.
 37. Marques, R., Krüger, R.F., Peterson, A.T. *et al.* Climate change implications for the distribution of the babesiosis and anaplasmosis tick vector, *Rhipicephalus (Boophilus) microplus*. *Vet Res* 51, 81 (2020). <https://doi.org/10.1186/s13567-020-00802-z>

38. Martens. W (1998). Health impacts of climate change and ozone depletion: an ecoepidemiologic modeling approach. *Environmental Health Perspectives*, 106(suppl 1), 241–251. <https://doi.org/10.1289/ehp.98106s1241>.
39. Medlock, JM, Hansford, KM, Bormane, A., Derdakova, M., Estrada-Peña, A., George, JC, Golovljova, I., Jaenson, TG, Jensen, JK, Jensen, PM, Kazimirova, M., Oteo, JA, Papa, A., Pfister, K., Plantard, O., Randolph, SE, Rizzoli, A., Santos-Silva, MM, Sprong, H., Vial, L., ... Van Bortel, W (2013). Fuerzas impulsoras de los cambios en la distribución geográfica de las garrapatas *Ixodes ricinus* en Europa. *Parásitos y vectores*, 6, 1. <https://doi.org/10.1186/1756-3305-6-1>
40. Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad de España (2016). Plan Nacional De Preparación Y Respuesta Frente A Enfermedades Transmitidas Por Vectores. Recuperado de: https://www.mscbs.gob.es/profesionales/saludPublica/ccayes/alertasActual/DocsZika/Plan_Nac_enf_vectores_20160720_sin_CC.pdf
41. Mullen R Gary, Durden A Durden. (2019) Medical and veterinary entomology. Recuperado de: https://web.natur.cuni.cz/parasitology/vyuka/LekEnt_CV/Mullen%20and%20Durden%20-%20Medical%20and%20Veterinary%20Entomology%202019.pdf
42. Murray. G & Murray. G. P (2014) Enfermedades Emergentes y Cambio Climático. UNAM Cómo ves?.192. Recuperado de: <http://www.comoves.unam.mx/numeros/indice/192>.
43. NASA (s.f) Causas del cambio climático. Recuperado de: <https://climate.nasa.gov/causas/>
44. NOAA (2020) Global Time Series. Recuperado de: https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/global/time-series/globe/land_ocean/ytd/12/1880-2018
45. Ostfeld, R. S., Levi, T., Jolles, A. E., Martin, L. B., Hosseini, P. R., & Keesing, F. (2014). Life history and demographic drivers of reservoir competence for three tick-borne zoonotic pathogens. *PloS one*, 9(9), e107387. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0107387>
46. Organización Colegial Veterinaria Española (2017). Campaña sobre prevención y control de enfermedades transmitidas por garrapatas. Colegio De Madrid. Recuperado de: <http://www.colvet.es/node/2839>

47. OMM (2019). La concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera alcanza un nuevo récord. Organización Meteorológica Mundial. Recuperado de: <https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/la-concentraci%C3%B3n-de-gases-de-efecto-invernadero-en-la-atm%C3%B3sfera-alcanza>
48. OMS (2013). Información sobre las enfermedades transmitidas por vectores. Organización mundial de la salud. Recuperado de: <https://www.who.int/campaigns/world-health-day/2014/vector-borne-diseases/es/>
49. OMS (2014) Enfermedades transmitidas por vectores. Organización Mundial de la Salud. Nota descriptiva N°387. Recuperado de: <http://www.comsor.es/pdf/oms/OMS%20%20Enfermedades%20transmitidas%20por%20vectores.pdf>
50. OMS (2017) Respuesta mundial para el control de vectores 2017-2030. Organización Mundial de la Salud. Recuperado de: https://www.who.int/malaria/areas/vector_control/Draft-WHO-GVCR-2017-2030-esp.pdf
51. Ortega-Huerta M et al (2008) Modeling ecological niches and predicting geographic distributions: a test of six presence-only methods. Recuperado de: <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmbiodiv/v79n1/v79n1a17.pdf>
52. Patz. J & Balbus. J. (1996). Methods for assessing public health vulnerability to global climate change. *Climate Research - CLIMATE RES.* 6. 113-125. doi:10.3354/cr006113.
53. Peterson, A. T., Ortega-Huerta, M. A., Bartley, J., Sánchez-Cordero, V., Soberón, J., Buddemeyer, R. H., & Stockwell, D. R. B. (2002). Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature*, 416(6881), 626–629. Recuperado de: <https://doi.org/10.1038/416626a>
54. Piccolin, G.; Benedetti, G.; Doglioni, C.; Lorenzato, C.; Mancuso, S.; Papa, N.; Pitton, L.; Ramon, M.C.; Zasio, C.; Bertiato, G. (2006). A Study of the Presence of *B. burgdorferi*, *Anaplasma* (Previously *Ehrlichia*) *phagocytophilum*, *Rickettsia*, and *Babesia* in *Ixodes ricinus* Collected within the Territory of Belluno, Italy. *Vector-Borne and Zoonotic Diseases*, 6(1), 24–31. doi:10.1089/vbz.2006.6.24

55. Purse, B. V., Masante, D., Golding, N., Pigott, D., Day, J. C., Ibañez-Bernal, S., ... Jones, L. (2017). How will climate change pathways and mitigation options alter incidence of vector-borne diseases? A framework for leishmaniasis in South and Meso-America. *PLOS ONE*, 12(10), e0183583. doi:10.1371/journal.pone.0183583
56. R (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
57. Raghavan RK, Peterson AT, Cobos ME, Ganta R, Foley D (2019) Current and Future Distribution of the Lone Star Tick, *Amblyomma americanum* (L.) (Acari: Ixodidae) in North America. *PLOS ONE* 14(1): e0209082. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209082>
58. Randolph, S. E. (2000). Ticks and tick-borne disease systems in space and from space. *Advances in Parasitology*, 217–243. doi:10.1016/s0065-308x(00)47010-7.
59. Reyes. L et. al. (2019) Evaluación de enfermedades transmitidas por vectores en perros de un área de clima sub-frío de México. *Acta biol. Colomb.* 2020;25(2) :219-224. DOI: <https://doi.org/10.15446/abc.v25n2.77737>
60. Rizzoli, A. et al. (2009). Forest Structure and Roe Deer Abundance Predict Tick-Borne Encephalitis Risk in Italy. *PLoS ONE*, 4(2), e4336. doi:10.1371/journal.pone.0004336
61. Robert W (2004). Global Change and Human Vulnerability to Vector-Borne Diseases. *Clinical Microbiology Reviews. American Society for Microbiology Journals.* <https://doi.org/10.1128/CMR.17.1.136-173.2004>
62. Rodríguez, J (2002) Las enfermedades transmitidas por vector en México. *Revista de la Facultad de Medicina.* 45(3). Recuperado de : <https://www.medigraphic.com/pdfs/facmed/un-2002/un023f.pdf>
63. Rohr. J et al. (2011). *Frontiers in climate change–disease research.* Elsevier , 26(6), 0–277. doi:10.1016/j.tree.2011.03.002.
64. Rosà R, Andreo V, Tagliapietra V, Baráková I, Arnoldi D, Hauffe HC, Manica M, Rosso F, Blaňarová L, Bona M, Derdáková M, Hamšíková Z, Kazimírová M, Kraljik J, Kocianová E, Mahríková L, Minichová L, Mošanský L, Slovák M, Stanko M, Špitalská E, Ducheyne E, Neteler M, Hubálek Z, Rudolf I, Venclikova K, Silaghi C, Overzier E, Farkas R, Földvári G, Hornok S, Takács N, Rizzoli A.

- Efecto de Clima y Uso de la Tierra sobre la Variabilidad Espacio-Temporal de las Bacterias Transmitidas por Garrapatas en Europa. *Int J Environ Res Salud Pública*. 12 de abril de 2018; 15 (4): 732. doi: 10.3390/ijerph15040732. PMID: 29649132; IDPM: PMC5923774.
65. Rosenberg R, Lindsey NP, Fischer M, et al. *Vital Signs: Trends in Reported Vectorborne Disease Cases — United States and Territories, 2004–2016*. *MMWR Morb Mortal Wkly Rep* 2018;67:496–501. DOI: <http://dx.doi.org/10.15585/mmwr.mm6717e1> external icon
66. Secretaria de salud (2018) Boletín epidemiológico. Dirección General de Epidemiología. 52(36). Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/522437/BSEMANAL_52.pdf
67. Secretaría de Salud (2016) Sistema especial de vigilancia epidemiológica de la Rickettsiosis en México. Dirección General de Epidemiología. Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/113038/Diagn_stico_por_lab_oratorio_de_Rickettsiosis_en_M_xico._InDRE.pdf
68. Sykes, Robert A.; Makiello, Phoebe (2016). An estimate of Lyme borreliosis incidence in Western Europe. *Journal of Public Health*, (), fdw017–. doi:10.1093/pubmed/fdw017.
69. Sonenshine D & Rore M. (2014) *Biology of ticks*, Segunda edición [PDF]
70. Sonenshine D (2018) Range Expansion of Tick Disease Vectors in North America: Implications for Spread of Tick-Borne Disease. Recuperado de: <https://www.mdpi.com/1660-4601/15/3/478/htm>
71. TaLleklint, L. & Jaenson, T. G. T. (1998). Increasing Geographical Distribution and Density of *Ixodes ricinus* (Acari: Ixodidae) in Central and Northern Sweden. *Journal of Medical Entomology*, 35(4), 521–526. doi:10.1093/jmedent/35.4.521
72. UNDRR (s.f), Vulnerability. United Nations Office for Disaster. Recuperado de: <https://www.undrr.org/terminology/vulnerability>
73. Vaughan, D., Doake, C. Recent atmospheric warming and retreat of ice shelves on the Antarctic Peninsula. *Nature* 379, 328–331 (1996). <https://doi.org/10.1038/379328a>
74. Wilches G. (1998) Auge, caída y levantada de Felipe Pinillo, mecánico y soldador o yo voy a correr el riesgo. *Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina*. Recuperado de:

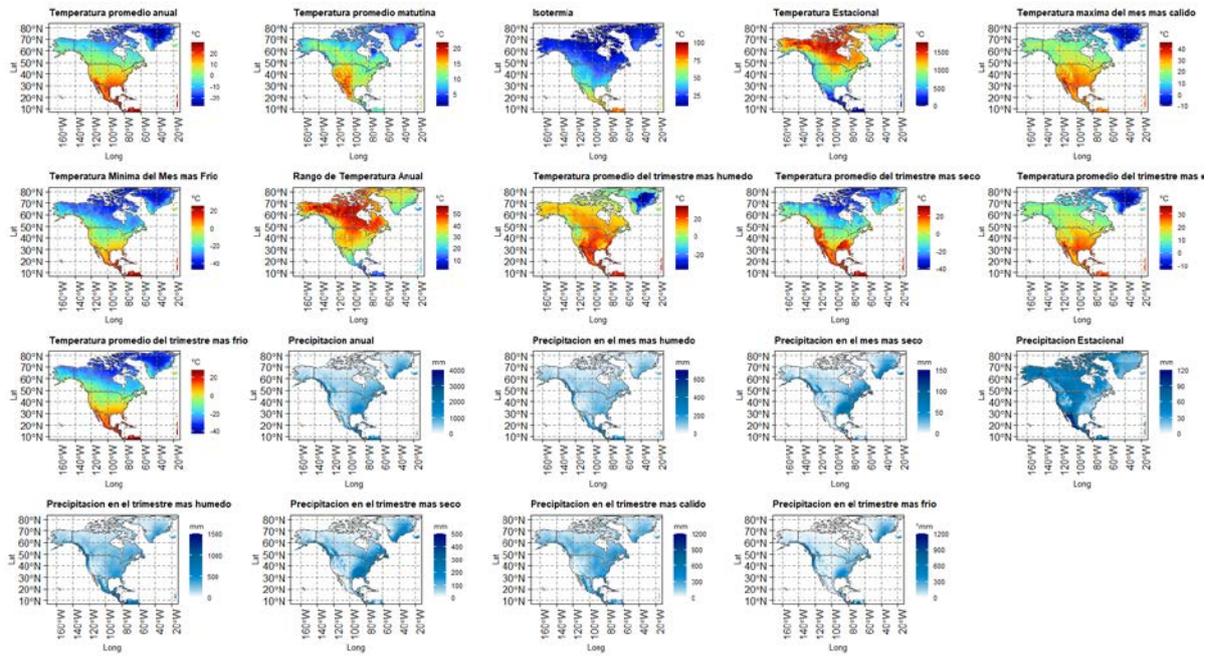
https://www.desenredando.org/public/libros/1998/gglr/GGLR_todo_ene-7-2003.pdf

75. WMO. (2020) State of global climate 2020. World Meteorological organization
Recuperado de: <https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate/wmo-statement-state-of-global-climate> .
76. Zhang Lu. et al. (2022). Projecting the Potential Distribution Areas of *Ixodes scapularis* (Acari: Ixodidae) Driven by Climate Change. Recuperado de: <https://www.mdpi.com/2079-7737/11/1/107/htm>
77. Zhang, X., Meltzer, M. I., Peña, C. A., Hopkins, A. B., Wroth, L., & Fix, A. D. (2006). Economic Impact of Lyme Disease. *Emerging Infectious Diseases*, 12(4), 653–660. doi:10.3201/eid1204.050602.

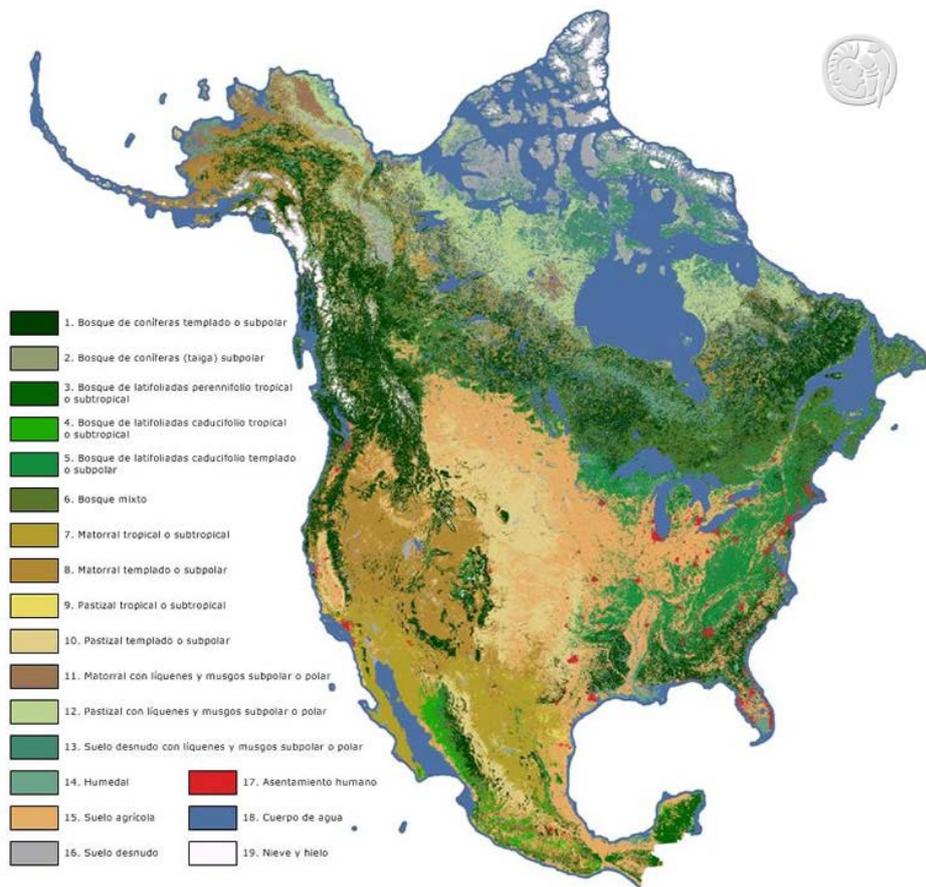
7. Anexos

BIO1 = Annual Mean Temperature
BIO2 = Mean Diurnal Range (Mean of monthly (max temp - min temp))
BIO3 = Isothermality (BIO2/BIO7) ($\times 100$)
BIO4 = Temperature Seasonality (standard deviation $\times 100$)
BIO5 = Max Temperature of Warmest Month
BIO6 = Min Temperature of Coldest Month
BIO7 = Temperature Annual Range (BIO5-BIO6)
BIO8 = Mean Temperature of Wettest Quarter
BIO9 = Mean Temperature of Driest Quarter
BIO10 = Mean Temperature of Warmest Quarter
BIO11 = Mean Temperature of Coldest Quarter
BIO12 = Annual Precipitation
BIO13 = Precipitation of Wettest Month
BIO14 = Precipitation of Driest Month
BIO15 = Precipitation Seasonality (Coefficient of Variation)
BIO16 = Precipitation of Wettest Quarter
BIO17 = Precipitation of Driest Quarter
BIO18 = Precipitation of Warmest Quarter
BIO19 = Precipitation of Coldest Quarter

Anexo 1. Variables bioclimáticas utilizadas para las proyecciones a futuro (Fick, S.E. and R.J. Hijmans, 2017. Worldclim 2).



Anexo 2. Cartografía de las variables bioclimáticas utilizadas para las proyecciones a futuro.



Anexo 3. Mapas de cambio en la Cobertura de Suelo de América del Norte (CONABIO s.f).