

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE INVASIÓN DE LAS ESPECIES DEL
GÉNERO *Triatoma* (HEMIPTERA: REDUVIIDAE) EN LATINOAMÉRICA
BAJO DIFERENTES ESCENARIOS CLIMÁTICOS**

Tesis

Que presenta MARIA GUADALUPE TORRES DELGADO

Como requisito parcial para obtener el Grado de
DOCTOR EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA

Torreón, Coahuila

Junio 2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE INVASIÓN DE LAS ESPECIES DEL
GÉNERO *Triatoma* (HEMIPTERA: REDUVIIDAE) EN LATINOAMÉRICA
BAJO DIFERENTES ESCENARIOS CLIMÁTICOS**


Tesis

Que presenta MARIA GUADALUPE TORRES DELGADO

Como requisito parcial para obtener el Grado de
DOCTOR EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA



Dr. Aldo I. Ortega Morales
Director UAAAN



Dr. Aldo Rafael Martínez Sifuentes
Director externo (INIFAP)

Torreón, Coahuila

Junio 2022

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE INVASIÓN DE LAS ESPECIES DEL
GÉNERO *Triatoma* (HEMIPTERA: REDUVIIDAE) EN LATINOAMÉRICA
BAJO DIFERENTES ESCENARIOS CLIMÁTICOS**

Tesis

Elaborada por MARIA GUADALUPE TORRES DELGADO como requisito parcial para obtener el grado de Doctor en Ciencias en Producción Agropecuaria con la supervisión y aprobación del Comité de Asesoría



Dr. Aldo Iván Ortega Morales
Asesor Principal



Dr. Aldo Rafael Martínez Sifuentes
Asesor



Dr. Francisco Gerardo Veliz Deras
Asesor



Dr. Francisco Javier Sánchez Ramos
Asesor



Dr. Enrique Ruiz Cancino
Asesor



Dra. Leticia Romana Gaytán Alemán
Jefe del Departamento de Postgrado



Dr. Marcelino Cabrera De La Fuente
Subdirector de Postgrado

AGRADECIMIENTOS

La **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**, me permitió llevar a cabo el proceso de Doctorado, por lo que estoy sinceramente agradecida.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**, por el apoyo de beca otorgada, siendo un elemento esencial para realizar el Doctorado.

Mis asesores: Dr. Aldo Iván Ortega Morales, Dr. Francisco Gerardo Véliz Deras, Dr. Francisco Javier Sánchez Ramos, Dr. Enrique Ruiz Cancino y en especial al Dr. Aldo Rafael Martínez Sifuentes.

A Aurelia Nájera Cruz por su apoyo incondicional, sus regaños y sus consejos, que sin ellos el proceso de cada uno de nosotros no sería concretado.

A Candelario Guzmán Aguilar por sus consejos, ánimos y regaños, que fueron fundamentales para seguir adelante siempre.

A las buenas amistades que se crearon y las que se fortalecieron, mis amigos Rahuel Chan, Aimir Hidalgo, Lupita Machado, Rafael Vázquez y Josué Manuel, que me acompañaron en el camino y me brindaron su apoyo incondicional.

Al Dr. Urbano Nava Camberos por su apoyo incondicional y consejos para realizar los objetivos planteados y superarme.

DEDICATORIA

A mi familia, mi motor y parte fundamental en todos los aspectos de mi vida.

Al Ing. Roberto Romero Nuñez amado esposo, por todo su apoyo y comprensión durante el proceso del Doctorado.

CARTAS DE ACEPTACIÓN DE LOS ARTÍCULOS
Aceptación de artículo 1



16Feb22

Estimada María Guadalupe Torres Delgado:

Me es grato comunicarle que su manuscrito "**Current and Future Spatial Modeling of Habitat Suitability of *Triatoma nitida* Usinger in Latin America**", SWE#3418, de los autores María Guadalupe Torres-Delgado, Francisco Gerardo Véliz-Deras, Francisco Javier Sánchez-Ramos, Enrique Ruíz-Cancino, Aldo Rafael Martínez-Sifuentes, Urbano Nava-Camberos, Verónica Ávila-Rodríguez, y Aldo Iván Ortega-Morales, ha sido aceptado para publicarse en la revista Southwestern Entomologist.

Sin más por el momento reciba un afectuoso saludo y le agradecemos su interés de publicar su interesante trabajo en nuestra revista.

Atentamente,

Carlos A. Blanco

Carlos A. Blanco, Editor Asociado
Carlos.a.blanco@aphis.usda.gov

Cc Dr. Bonnie Pendleton, Editor- in-Chief.

Envío de artículo 2

[RMB] Acuse de recibo de artículo Recibidos x  

 **Fernando Álvarez Noguera** <revmexbio@i... 18:03 (hace 44 minutos)   

para mí ▾

Maria Guadalupe Torres Delgado:

Gracias por enviar el manuscrito "Efecto del cambio climático actual y futuro sobre la distribución de 18 especies de importancia medica del género Triatoma en América" a Revista Mexicana de Biodiversidad.

Con nuestro sistema de gestión de revistas en línea, podrá iniciar sesión en el sitio web de la revista y hacer un seguimiento de su progreso a través del proceso editorial.

URL del manuscrito: <http://revista.ib.unam.mx/index.php/bio/authorDashboard/submission/5041>

Nombre de usuario/a: 1mariatorres91

ES IMPORTANTE QUE USE UN ÚNICO REGISTRO PERSONAL PARA MÚLTIPLES CONTRIBUCIONES (TRATAMIENTO EDITORIAL, CONSULTAS, ETC).

En caso de dudas sobre el registro, contacte con la Editora técnica Ma. Antonieta Arizmendi (aarizmen@ib.unam.mx). Gracias por elegir esta revista para publicar su trabajo.

Fernando Álvarez Noguera

Revista Mexicana de Biodiversidad <http://www.revista.ib.unam.mx>

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	ii
DEDICATORIA	iii
CARTAS DE ACEPTACIÓN DE LOS ARTÍCULOS.....	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT.....	xi
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Hipótesis general.....	4
1.2 Objetivos	5
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	6
2.1 Triatomas	6
2.1.1 Historia.....	6
2.1.2 Morfología.....	7
2.1.3 Importancia médica.....	9
2.1.4 Transmisión de <i>Trypanosoma cruzi</i>	10
2.1.5 Taxonomía.....	11
2.2 Distribución general de triatomas en América	15
2.3 Modelos predictivos en distribución geográfica	16
2.4 Nicho ecológico	17
2.5 Diagrama BAM.....	17
2.6 Modelos de nicho ecológico	18
2.9 Cambio Climático	20
2.10 Modelos climáticos	21

CAPÍTULO 1. REVISIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN Y ECOLOGIA DE LAS ESPECIES DEL GÉNERO <i>Triatoma</i> (HEMIPTERA: REDUVIIDAE) EN AMÉRICA	30
CAPÍTULO 2. Current and Future Spatial Modeling of Habitat Suitability of <i>Triatoma nitida</i> Usinger in Latin America	45
CAPÍTULO 3. Efecto del cambio climático actual y futuro sobre la distribución de 18 especies de importancia médica del género <i>Triatoma</i> en América.....	68
6. CONCLUSIONES GENERALES	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Morfología general de una especie de triatomino (<i>T. rubrofasciata</i>).....	8
Figura 2	Características morfológicas generales (<i>T. rubrofasciata</i>).....	9
Figura 3	Diagrama BAM, modificado de Soberón (2010).....	21
Figura 4	Emisiones globales de CO2 (gigatoneladas, GtCO2)	24
Figura 5	Valores ECS de los 40 modelos CMIP6 disponibles.....	25

RESUMEN

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE INVASIÓN DE LAS ESPECIES DEL GÉNERO *Triatoma* (HEMIPTERA: REDUVIIDAE) EN LATINOAMÉRICA BAJO DIFERENTES ESCENARIOS CLIMÁTICOS

MARIA GUADALUPE TORRES DELGADO

Para obtener el Grado en Doctor en Ciencias en Producción Agropecuaria

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
UNIDAD LAGUNA

DR. ALDO I. ORTEGA MORALES

Director de tesis.

El género *Triatoma* es uno de los grupos taxonómicos de mayor importancia médica por la capacidad vectorial del parásito *Trypanosoma cruzi*. Se modeló un total de 18 especies distribuidas en toda América, obteniendo 14825 registros de presencia, los cuales fueron proyectados mediante el algoritmo de MaxEnt para el clima actual y futuro, utilizando los modelos de circulación CNRM-CM6-1 y GFDL-ESM4 para el período 2041-2060 bajo los SSP1-2.6, SSP5-8.5 y SSP3-7.0, donde se estimó una superficie total actual de 51, 365, 341 km² a partir de los PMC de las especies bajo el clima actual y para los modelos futuros se observó dispersión y disminución en la distribución de todas las especies, modificando el patrón epidemiológico actual. El cambio climático influye directamente en la distribución y el comportamiento, siendo *Triatoma nitida* especie que se ha detectado con este patrón, se modeló la distribución actual y futura para los períodos 2041-2060 y 2081-2100, al considerar el modelo de BCC-CSM bajo los SSP1-2.6 y SSP5-8.5, obteniendo como resultado del clima actual una superficie estimada para Latinoamérica de 2, 089,284 km², para los climas futuros fue de 205,515 km² para 2041-2060 y de 857 km² para 2081-2100. Se identificaron nuevas zonas geográficas con las características climáticas necesarias para el establecimiento de las diferentes especies de mayor importancia médica, incrementando la probabilidad de aumentar la zona de infección por el parásito *T. cruzi* a nuevas zonas de América.

Palabras claves: Modelo predictivo, nicho ecológico, cambio climático, triatominos

ABSTRACT

EVALUATION OF THE INVASION POTENTIAL OF SPECIES OF THE GENUS *Triatoma* (HEMIPTERA: REDUVIIDAE) IN LATIN AMERICA UNDER DIFFERENT CLIMATE SCENARIOS

MARIA GUADALUPE TORRES DELGADO

Degree of Doctor of Science in Agricultural Production

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

ALDO I. ORTEGA MORALES

Thesis's director

The genus *Triatoma* is one of the taxonomic groups of greatest medical importance due to the vectorial capacity of the parasite *Trypanosoma cruzi*. A were modeled 18 species distributed throughout the Americas 14,825 presence records were obtained, which were projected using the MaxEnt algorithm for the current and future climate projections, using the CNRM-CM6-1 and GFDL models. For the period 2041-2060 under the SSP1-2.6, SSP5-8.5 and SSP3-7.0 scenarios, were estimated a current total area of 51, 365, 341 km² from the PMC of the species under the current climate and for the future models, dispersion and decrease in the distribution of all species were observed, modifying the current epidemiological pattern. Climate change directly influences the distribution and behavior, being *Triatoma nitida* the species that has been detected with this pattern, the current and future distribution was modeled for the periods 2041-2060 and 2081-2100, considering the BCC-CSM model under SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios. As a result of the current climate an estimated area for Latin America of 2,089,284 km², for future climates 205,515 km² for 2041-2060 and 857 km² for 2081-2100. New geographical areas with the climatic characteristics necessary for the establishment of the different species of greatest medical importance were identified, increasing the probability of expanding the area of infection by the parasite *T. cruzi* to new areas of America.

Keywords: Predictive model, ecological niche, climate change, triatomines

INTRODUCCIÓN

Actualmente la enfermedad de Chagas se presenta a nivel mundial debido a la movilidad antrópica, pero su origen nativo se centra en los países de Latinoamérica y en Estados Unidos, siendo considerada endémica del norte, centro y sur de América, es una de las parasitosis con mayor incidencia, ocupando el tercer lugar después de la malaria y la esquistosomiasis (Rivero, 2016). La principal forma de transmisión es vectorial y las especies que realizan esta función pertenecen a la subfamilia Triatominae, la cual abarca hasta 150 especies descritas a nivel mundial, pero solo algunas especies son de importancia médica, debido a la eficiencia de la capacidad vectorial de *Tripanosoma cruzi* (Guhl y Lazdins-Heid, 2007, Guhl, 2017). Las especies de importancia médica se encuentran agrupadas en los géneros *Rhodnius*, *Pastronylus* y *Triatoma*, siendo este último el que agrupa la mayor diversidad y aunque no todas las especies participan en la transmisión del parásito, son consideradas vectores potenciales (Castillo-Barraza et al 2010). El género *Triatoma* agrupa 67 especies que habitan nichos selváticos, peridomiciliarios e intradomiciliarios (Lent and Wygodzinsky 1979, Galvão et al. 2003, Ibarra-Cerdeña et al. 2009).

La distribución geográfica actual de los triatominos está muy relacionada a su biología y ecología, siendo hematófagos obligados las adaptaciones que han desarrollado a lo largo de la historia debido a diferentes factores antropogénicos o naturales que les ha permitido tener éxito evolutivo, por lo que la modificación en su nicho ecológico les ha permitido ser más cercanas a la civilización, afectando de manera directa la salud humana (Eliosa-León et al. 2010, Ibarra-Cerdeña et al. 2009). Estas condiciones ambientales y ecológicas que permiten el desarrollo de las especies de triatomas se han mantenido por mucho tiempo, lo cual permite desarrollar modelos predictivos actuales y futuros en la red de referencia geográfica que ayudan a identificar las zonas potenciales de nicho ecológico y climático en las localidades de muestreo para la prevención oportuna de la enfermedad de Chagas en zonas rurales o urbanas (Peterson 2001,

Soberón 2010, Carmona-Castro et al., 2018). Estos Modelos de Nicho Ecológico (MNE) se han empleado para definir las zonas potenciales de ocurrencia de varias especies de triatomas en distintos países de América (Costa et al., 2002; Sandoval-Ruiz et al., 2008; Ibarra-Cerdeña et al. 2009; Gurgel-Goncalves *et al.* 2012; Ramsey et al., 2015, Carmona-Castro et al., 2018).

Aunado a esto, se ha reportado que la influencia del clima en las distribuciones es debido a sus requerimientos relacionados con la temperatura y la humedad, ya que cada especie presenta tolerancias distintas a diversos factores ambientales, por lo tanto, la respuesta ante las variaciones climáticas será diferente para cada una de ellas, siendo positiva o negativa sobre las poblaciones de triatomos (Carcavallo, 1999, Walther et al., 2002, Hardy, 2003, Dawson y Spannagle, 2009). Bajo este contexto, se han reportado movimientos en la distribución de las especies de triatomas y cambios en el comportamiento de anidación, lo que afecta significativamente los patrones epidemiológicos (Lorenzo y Lazzari, 1999; Guarneri et al., 2003; Lambert et al., 2008; Lazzari et al., 2013, Githeko et al., 2000; Gage et al., 2008; Pearman et al., 2008).

Los cambios del clima y la modificación de los ecosistemas influyen en la acumulación de gases de efecto invernadero (GEI), debido a esto el Intergovernmental Program on Climate Change (IPCC) propuso una serie de escenarios como tendencias, basados en las emisiones de GEI para el modelaje de las proyecciones a futuro. Los modelos de proyección que se presentaron en el quinto informe de evaluación del IPCC de 2013 (AR5) utilizados hasta el 2020, fueron a partir de las Vías Representativas de Concentración (RCP) y se actualizaron en el Coupled Model Intercomparison Projects (CMIP6) por los SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP4-6.0 y SSP5-8.5, cada uno de los cuales da como resultado niveles de forzamiento radiativo de 2100 similares a los de su predecesor en AR5 (Carmona-Castro et al. 2018, IPCC, 2020). La importancia de la actualización de las proyecciones bajo los modelos actuales permite redefinir las estrategias de manejo y control de los vectores de la enfermedad de Chagas. Por lo tanto, surge la necesidad de estudiar las proyecciones en el tiempo y espacio de las zonas potenciales de invasión de las poblacionales de triatomos,

con el objetivo de predecir y controlar a tiempo los posibles casos de transmisión vectorial en toda América. El presente proyecto tiene como finalidad primordial evaluar dicho potencial de invasión de las especies del género *Triatoma* en América, considerando diferentes entornos climáticos.

1.1 Hipótesis general

Las especies del género *Triatoma* han presentado requerimientos climáticos distintos a través de su historia evolutiva, lo cual influye en su capacidad para colonizar nuevos entornos geográficos, por lo tanto, el cambio climático afectará de manera particular el potencial de invasión de estas especies para los años 2041-2060 y 2081-2100.

1.2 Objetivos

Objetivo General

Evaluar el potencial de invasión de las especies del género *Triatoma* en Latinoamérica bajo diferentes escenarios climáticos.

Objetivos específicos

1. Revisar la distribución y ecología de las especies del género *Triatoma*.
2. Modelar la idoneidad de hábitat actual y futura de *Triatoma nitida* Usinger (especie selvática de alerta epidemiológica) en Latinoamérica.
3. Evaluar el nicho climático de las principales especies de importancia médica del género *Triatoma* en América y su capacidad de invasión bajo diferentes escenarios de cambio climático.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Triatomas

Los insectos triatominos son reconocidos en diferentes países, comúnmente llamados chinches, vinchucas, barbeiros, uluchis, chipos, pitos, chinches besuconas o kissing bugs, con algunas especies distintas en cada región, su importancia es principalmente médica debido a que son los vectores principales de *Trypanosoma cruzi* (Chagas), parásito que genera la enfermedad de Chagas, una parasitosis zoonótica exclusiva de América Latina (Schofield y Galvão 2009). Esta tripanosomiasis americana se cataloga por la Organización Mundial de la Salud (OMS) como una de las más importantes dentro de las enfermedades desatendidas a nivel mundial (OMS 2022).

Se ha comprobado que estas chinches tienen la capacidad de infectarse con el parásito de manera natural o artificial, por lo que es muy probable que cualquier especie de triatomo sea potencial transmisor (Ghul 2017). La facultad que tienen estos insectos de infectar a sus huéspedes se basa en tres factores principales: 1. Alta especificidad que posee el parásito *T. cruzi* para desarrollarse en el tubo digestivo de los triatominos; 2. Alto grado de asociación entre diferentes especies de triatomas y su coexistencia en viviendas humanas; 3. Los periodos relativamente cortos entre la alimentación y la deyección, permitiendo el ingreso de los parásitos por la herida de la zona de alimentación (Lent y Wygodzinsky 1979).

2.1.1 Historia

Los antecedentes más antiguos que se tienen en nuestro país sobre la presencia de los triatominos datan de 1523, donde Antonio de Herrera se refirió a la expedición de Francisco Garay y señaló que “*el ejército expedicionario fue víctima de los “pitos” que pican y dejan señal como chinches y dan calentura*” (Zeledon, 1983). Sin embargo, no es sino centurias más adelante que Burmeister en 1835 hace referencia a *Triatoma phyllosoma* en el estado de Oaxaca. En 1848 *Triatoma mexicana* fue registrada por Herrich-Schaeffer para los estados de Hidalgo y Querétaro. En 1894, Ulher hizo referencia a *Dipetalogaster maximus*, *Triatoma protracta* y *Triatoma rubida* (Carcavallo et al. 1999). Para 1912, Neiva

estudió y clasificó a *Triatoma indictiva*. Un cuarto de siglo más tarde, Barber en 1938 encontró, estudió y dio nombre a *Paratriatoma hirsuta* y un año después Usinger hizo lo mismo con *T. barberi*, *T. incrassata*, *T. longipennis*, *T. nitida* y *T. picturata*. En 1936, Mazzottii publicó los primeros hallazgos sobre triatominos naturalmente infectados con el parásito en el estado de Oaxaca (Lent y Wygodzinsky 1979, Haro et al. 1999, Galvão 2003, Velasco-Castrejón y Rivas-Sánchez 2008, Galvão y Jurberg 2014).

2.1.2 Morfología

Las similitudes en morfología, comportamiento y estrategias de reproducción reflejan la naturaleza de sus ancestros depredadores, en función a los cambios adaptativos se especializaron en alimentarse exclusivamente de sangre de una diversidad de especies, modificando su estructura morfológica para lograr su eficiencia alimenticia. Las principales características en los triatomas son: cabeza con longitud intermedia, antenas insertadas en el punto medio entre los ojos y el clípeo y aparato bucal modificado para perforar y chupar (Schofield y Galvão 2009, Weinrauch et al. 2014). La forma de la probóscide es recta y delgada, modificada para perforar las zonas más blandas de sus presas, guardándola bajo la cabeza cuando no está en uso, colocándose entre el primer par de patas (Figura 1) (Sorensen et al. 1995, Galvão y De Paula 2014, Otálora-Luna et al. 2015).

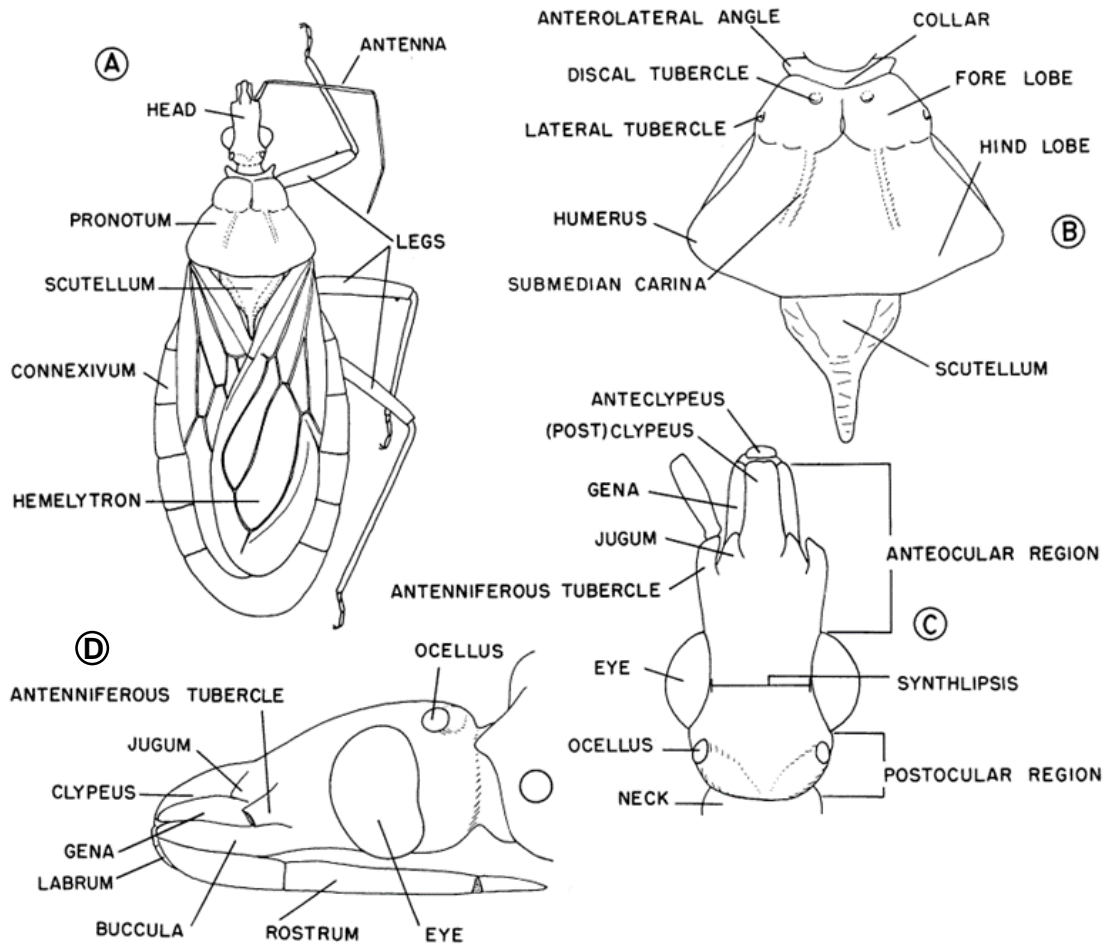


Figura 1. Morfología general de una especie de triatomino (*T. rubrofasciata*). A) Aspecto general; B) Pronoto y escutelo, vista dorsal; C) Cabeza, vista dorsal. D) Cabeza, vista lateral. Modificado de Lent y Wygodzinsky (1979).

El tamaño de estos insectos es variable, desde unos cuantos milímetros hasta centímetros, por lo que requieren cuando menos 30 minutos para alimentarse, no obstante, estos insectos tienen un vuelo, generalmente, torpe y lento cuando son interrumpidos defensivamente por el huésped (Guhl et al. 2000). A pesar de su gran diversidad de formas y tamaños, se pueden distinguir por la combinación de detalles morfológicos como un cuello, antenas de cuatro segmentos de inserción lateral, probóscide de tres segmentos y la presencia del surco estridulatorio sobre prostenum (Figura 2) (Carcavallo et al. 2000, Pérez et al. 2003). El color del cuerpo varía de amarillo claro a negro, según la especie el patrón de manchas

(anaranjadas, amarillas, blancas, rojas, grises o verdes) es diferente según la especie, principalmente en el connexivum (Lent y Wygodzinsky 1979).

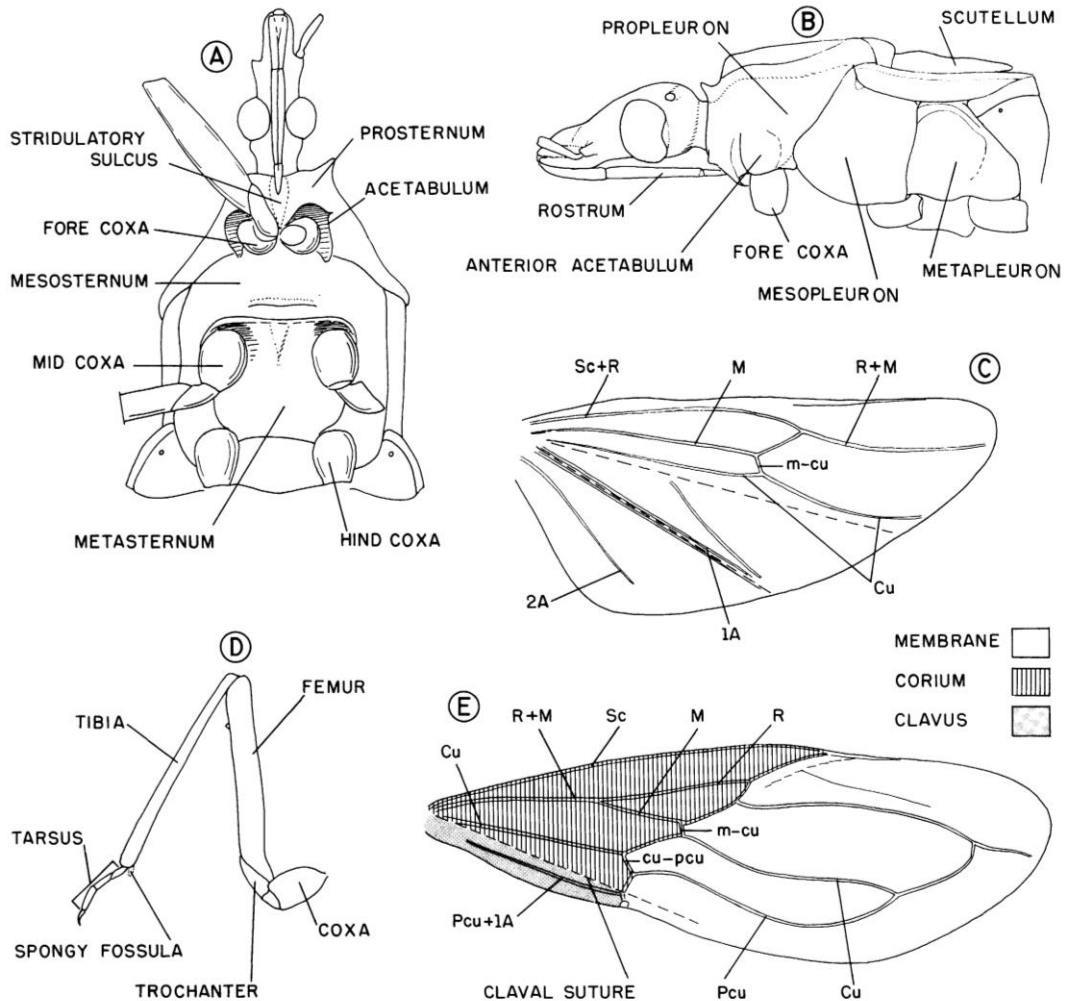


Figura 2. Características morfológicas generales (*T. rubrofasciata*). A) Cabeza y tórax, vista ventral; B) Ídem, vista lateral; C) ala trasera; D) Pata delantera; E) Hemélitro (Venas de las alas: IA, primera anal; 2A, segunda anal; Cu, cúbito; M, media; Pcu, postcúbito; R, radio; SC, subcosta. Venas cruzadas; m-cu; cu-pcu). Modificado de Lent y Wygodzinsky (1979).

2.1.3 Importancia médica

Dentro de las enfermedades transmitidas por vectores (i.e., enfermedades de tipo metaxénicas), las cuales ocasionan el 17% de las patologías infecciosas con más de un millón de decesos (OMS 2016a), el mal de Chagas es por mucho una de

las 17 patologías tropicales desatendidas o “enfermedades de la pobreza” más impactantes de la sociedad, siendo la principal causa de mortalidad por enfermedades de origen parasitario en América Latina, que se estima en 12,000 muertes por año, con 13% de la población de la región en riesgo de adquirirla y con alrededor de 6 millones de individuos parasitados; una prevalencia de 7-8 millones de infecciones en todo el globo terráqueo y una incidencia de 28,000 casos anuales en América; además, de las cuantiosas pérdidas económicas valoradas por gastos sanitarios y años de vida productivos perdidos (por discapacidad), por ello, a la enfermedad de Chagas se le tiene como la patología de origen parasitario que ocasiona el mayor impacto socio-económico en América Latina; de hecho es una dolencia asociada a la pobreza, al existir una asociación entre las poblaciones triatominas y las condiciones de pobreza de las viviendas (Lee et al. 2013, WHO 2015). Aunque la enfermedad de Chagas es propia o autóctona de América donde es endémica en 21 países, con las migraciones, los turistas e incluso la adopción de niños nativos de la zona, la frecuencia de incidencia en países desarrollados incrementa, donde se estima en 500,000 infectados y 7,000 fallecimientos/año (WHO 2012, 2015, OMS 2020).

2.1.4 Transmisión de *Trypanosoma cruzi*

Después de 10 a 20 días de la primera cópula, se lleva a cabo la oviposición. Los huevecillos son ovoides, blancos o cremosos, oscureciéndose hasta que el embrión madura y eclosiona (Schofield, 1994). Cada especie presenta una arquitectura distinta, por lo que esta característica tiene importancia taxonómica (Barata, 1981). La eclosión se produce de 10 a 40 días después de la oviposición. Las ninfas son capaces de alimentarse a los 2 o 3 días de la eclosión; pueden ingerir entre 8 y 9 veces su peso, mientras que los adultos sólo toman entre 2 y 4 veces (Schofield, 1994). Todos los triatominos pasan por cinco estadios ninfales, al final de cada uno, se produce una muda para pasar al siguiente estadio. *Triatoma dimidiata*, puede tardar de 1 a 2 años en completar su ciclo de vida.

Como sus congéneres trypanosomátidos, *T. cruzi* puede alcanzar varias formas de desarrollo durante sus ciclos de transmisión, incluyendo básicamente: amastigote, epimastigote, tripomastigote metacíclico y tripomastigote sanguícola (Botero y Restrepo 2012). Cuando un vertebrado susceptible se encuentra infectado, esta última forma señalada se presenta circulando en la sangre; los triatomíneos tienen un ritmo circadiano que les permite esconderse durante el día como típicamente hacen algunos vectores, entre grietas de los materiales de construcción de las viviendas de condiciones socio-económicas más precarias de América Latina, y salir en horas nocturnas para succionar sangre; si el vertebrado se encuentra infectado, el insecto ingiere los tripomastigotes sanguícolas, los cuales al llegar a su promesenterio (“estómago”) se convierten en formas redondeadas (esferomastigote), y luego en el postmesenterio (“intestino”) evolucionan a la forma de epimastigote y se dividen asexualmente por fisión binaria; finalmente la metaciclogénesis ocurre en la ampolla rectal del triatomíneo, el cual al volver a picar a un hospedador vertebrado el tripomastigote metacíclico se transmite por las heces/orina a través de una herida en la piel o en el sitio de la picadura o mucosas (ojos, boca, fosas nasales); una vez dentro, los parásitos son fagocitados por macrófagos, se transforman en amastigotes y se dividen activamente por fisión binaria, para luego transformarse en tripomastigotes y continuar invadiendo los tejidos de varios órganos y dividirse en la forma de amastigotes (Kollien y Schaub 1998, Botero y Restrepo 2012).

2.1.5 Taxonomía

Los triatomíneos pertenecen a la siguiente ubicación taxonómica (Ruggiero et al. 2015).

Superreino EUKARIOTA (Chatton, 1925) Whittaker y Margulis, 1978

Reino ANIMALIA Linnaeus, 1758

Subreino BILATERIA (Hatschek 1888) Cavalier-Smith, 1983

Filo ARTHROPODA Latreille, 1829

Subfilo HEXAPODA Latreille, 1825

Clase INSECTA Linnaeus, 1758
Subclase PTERYGOTA Brauer, 1885
Orden HEMIPTERA Linnaeus, 1758
Suborden HETEROPTERA Latreille, 1810
Infraorden CIMICOMORPHA Leston et al. 1954
Superfamilia REDUVIDOIDEA Latreille, 1807
Familia REDUVIIDAE Latreille, 1807
Subfamilia TRIATOMINAE Jeannel, 1919

De acuerdo con los reportes, la subfamilia comprende 150 especies clasificadas, aunque existe mucha controversia entre la designación de las tribus, ya que difieren entre 5 y 6 tribus, siendo Alberproseniini, Bolboderini, Cavernicolini, Linshcosteini, Rhodniini y Triatomini según la taxonomía de Galvão et al (2003). La designación de la tribu Linshcosteusini (Carcavallo et al. 2000) para ubicar las especies del género *Linshcosteus* Distant, 1904 del subcontinente indio, actualmente no tiene mucha aceptación, debido a que estas taxa se encuentran más relacionadas genéticamente con *Triatoma rubrofasciata* (De Geer, 1773) (Hypša et al. 2002, Schofield y Galvão 2009).

Dependiendo del criterio del investigador se reconocen de 15 a 19 géneros entre todas las tribus (Lent y Wygodzinsky 1979, Galvão et al. 2003, Guhl 2017). La tribu Triatomini se conforma por los géneros *Dipetalogaster* (Usinger, 1939), *Eratyrus* (Stål, 1859), *Hermanlenticia* (Jurberg & Galvão, 1997), *Meccus* (Stål, 1859), *Mepraia* (Mazza, Gajardo & Jörg, 1940), *Nesotriatoma* (Usinger, 1944), *Panstrongylus* (Berg, 1879), *Paratriatoma* (Barber, 1938) y *Triatoma* (Laporte, 1832), siendo este último género el que agrupa la mayor cantidad de especies (Galvão et al. 2003).

Al respecto, la controversia se suscita especialmente con los géneros *Mepraia* Mazza, Gajardo y Jorg, 1940, *Nesotriatoma* Usinger 1944 y *Meccus* Stål, 1859, al considerar algunos autores que son sinonimias de *Triatoma* spp. Laporte,

1832, mientras que otros taxónomos los presentan como entidades separadas e íntegras (Galvão et al. 2003, Schofield y Galvão 2009, Justi et al. 2014).

Los géneros se asignan a grupos o complejos basados en características principalmente morfológicas como la presencia de tubérculos ocelares, forma de la cabeza, clípeo, etc., (Ibáñez-Bernal y Paz-Rodríguez, 1998). Según la clasificación realizada por Lent y Wygodzinsky (1979), el género *Triatoma* se subdivide en dos grandes grupos Protracta (ninfas de primer estadio carecen de pelos especializados en el metatarso) y Rubrofasciata (ninfas de primer estadio presentan pelos especializados en el metatarso). Dentro del Grupo Protracta se reconocen dos complejos de especies, el complejo Protracta (caracterizado por el cuerpo fusiforme y patas relativamente cortas de los adultos) que incluye a *T. barberi*, *T. neotomae*, *T. protracta* y por confirmar *T. incrassata*, *T. nítida*, *T. peninsularis* y *T. sinaloensis*, especies con clara distribución mesoamericana; y el complejo Lenticularia (definido por el cuerpo más ancho y patas comparativamente largas o de tamaño normal de los adultos), que alberga a *T. indictiva*, *T. lecticularia* y *T. sanguisuga*, todas con distribución en el sur de los EUA y dos con extensiones al Norte de México (Ibáñez-Bernal y Paz-Rodríguez, 1998; INDRE, 1999).

El Grupo Rubrofasciata fue subdividido en complejo Infestans (presencia de gránulos conspicuos en la porción dorsal del abdomen de la ninfa de quinto estadio) y Rubrofasciata (presentan el dorso del abdomen del quinto estadio liso o, cuando mucho, con gránulos minúsculos), se integra por seis complejos: Rubrofasciata, Spinolai (especies sudamericanas), Flavida (especies de las islas del Caribe), Nigromaculata (especies sudamericanas), Phyllosoma (especies distribuías sólo en México) y Recurva (que incluye a *T. recurva* y *T. gerstaeckeri* del sur de Estados Unidos y norte de México). El complejo Phyllosoma es más diverso, agrupa a especies con características de abdomen ancho y la presencia de tubérculos torácicos prominentes. Este grupo es el de mayor importancia epidemiológica incluyendo a las especies *T. phyllosoma*, *T. dimidiata*, *T. mazzottii*, *T. mexicana*, *T. longipennis*, *T. pallidipennis* y *T. picturata* (Ibáñez-Bernal y Paz Rodríguez, 1998). La mayoría de las especies de importancia

epidemiológica pertenecen al género *Triatoma*, por lo que diversos autores señalan un total de 34 especies distribuidas en toda América (Ramsey et al. 2015, Ghul, 2017, Carmona-Castro 2018) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Taxonomía del género *Triatoma*, se observan los complejos, especies y subespecies, registrados. Según Ramsey et al. (2015).

No.	COMPLEJO	ESPECIE	SUB-ESPECIE
1	Lecticularia	<i>Triatoma incrassata</i>	
2		<i>Triatoma indictiva</i>	
3		<i>Triatoma lecticularia</i>	
4	Protracta	<i>Triatoma barberi</i>	
5		<i>Triatoma neotomae</i>	
6		<i>Triatoma nitida</i>	
7		<i>Triatoma peninsularis</i>	
8		<i>Triatoma protracta</i>	<i>T. p. protracta</i>
9			<i>T. p. nahuatlae</i>
10			<i>T. p. woodi</i>
11		<i>T. p. zacatecensis</i>	
12		<i>Triatoma sinaloensis</i>	
13	Rubida	<i>Triatoma rubida</i>	<i>T. r. cochimiensis</i>
14			<i>T. r. jaegeri</i>
15			<i>T. r. rubida</i>
16			<i>T. r. sonora</i>
17			<i>T. r. uhleri</i>
18	Phyllosoma	<i>Triatoma bassolsae</i>	
19		<i>Triatoma brailovskyi</i>	
20		<i>Triatoma bolivari</i>	
21		<i>Triatoma gerstaeckeri</i>	
22		<i>Triatoma longipennis</i>	
23		<i>Triatoma mazzottii</i>	
24		<i>Triatoma mexicana</i>	

25		<i>Triatoma pallidipennis</i>
26		<i>Triatoma phyllosoma</i>
27		<i>Triatoma picturata</i>
28		<i>Triatoma recurva</i>
29	Dimidiata	<i>Triatoma dimidiata</i> hg 1
30		<i>Triatoma dimidiata</i> hg 2
31		<i>Triatoma dimidiata</i> hg 3
32		<i>Triatoma hegneri</i>
33		<i>Triatoma gomeznunezi</i>
34		<i>T. sanguisuga occidentalis</i>

2.2 Distribución general de triatomas en América

La mayor cantidad de triatomos se distribuyen en el continente americano desde Estados Unidos hasta la Patagonia (46° N a 46° S), aunque en las regiones de África, Asia y Australia se registra sólo el género *Linshcosteus* (Schofield y Galvão 2009). En América del Norte, en el área restringida al Suroeste de los Estados Unidos y Noroeste de México, se tienen especies de Triatomos como *Triatoma sanguisuga*, *Triatoma gestaekeri*, *Dipetalogaster maximus*, *Triatoma protracta* y *T. rubida*, algunas de ellas se han asociado a casos clínicos autóctonos de la enfermedad de Chagas. En América del Sur, se estudian a *Triatoma infestans*, *Triatoma brasiliensis* y *Triatoma dimidiata* principalmente (Ramsey 2003).

El rango de distribución de las especies de Triatominae y su asociación con la distribución en localidades rurales y urbanas, ha propiciado el contacto de la población humana principalmente con especies de los cinco complejos de *Triatoma* (Dimidiata, Leticularia, Phyllosoma, Protracta y Rubida) (Ibarra-Cerdeña et al. 2009). Aunque las especies del complejo dimidiata y la mayoría de las especies del complejo phyllosoma se distribuyen en la región Neotropical, algunas de este último y una del complejo protracta se extienden también a la región Neártica. Asimismo, las demás especies del complejo protracta, así como

del lecticularia y rubida, solamente se encuentran en la región Neártica, distribuídas entre ambos países. La sobrevivencia y permanencia de las especies de Triatominae en las zonas actuales está basada principalmente en la relación ecológica y ambiental manteniendo ese patrón a través del tiempo, lo que permite usar la robustez de los MNE para analizar potenciales cambios en la distribución geográfica por efecto de las modificaciones climáticas, ambientales y las migraciones poblacionales esperadas en escenarios futuros (Carmona-Castro 2018).

2.3 Modelos predictivos en distribución geográfica

El avance en la tecnología ha permitido actualizar y diseñar algoritmos que permiten el modelado de los nichos ecológicos de todas las especies, mejorando en los últimos años la precisión y ayudando en gran variedad de aplicaciones. Los modelos de predicción se desarrollan a partir de bases como la biogeografía, siendo el campo de estudio de la distribución de las especies, el uso más frecuente de estos modelos es predecir o modelar las zonas donde se encuentran actualmente las especies, ayudando a establecer patrones biogeográficos que posteriormente ayudan a identificar o regionalizar áreas importantes (Illoldi-Rangel y Escalante 2008).

Existen diferentes modelos que presentan determinada similitud entre ellos, que se suelen confundir, pero aunque las diferencias sean mínimas su aplicación debe ser bien implementada, por mencionar algunos de ellos, como el modelado de distribución de especies, modelos predictivos de hábitat, modelos de idoneidad de hábitat o modelos de nicho ecológico, se basan principalmente en el supuesto de que cada especie mantiene condiciones ambientales y otros factores durante su adaptación actual, considerándolo como una constante actual en el tiempo estos factores se toman como constantes, lo que permite realizar proyecciones del pasado o futuras (Guisan y Zimmermann 2000; Saupe et al., 2012).

Este tipo de datos, derivados de las relaciones, son manipulados más adecuadamente a través de un Sistema de Información Geográfica (SIG),

herramienta que también se ha desarrollado en las últimas décadas y que ha tenido gran influencia en el desarrollo del modelamiento de los nichos y de las áreas de distribución (Araújo y Luoto 2007).

2.4 Nicho ecológico

Siendo el concepto muy controversial hasta la actualidad, el nicho ecológico ha sido interpretado de muchas maneras por distintos autores, siendo la base esencial del mismo la interacción de las especies con los factores bióticos y abióticos (Grinnell 1917; Elton 1927; Hutchinson 1957; Peterson 2012). El nicho Grinneliano se centra en las características ambientales, delimitando la distribución de las especies (Grinnell 1917). Posteriormente, Elton (1927) propone el nicho Eltoniano donde se integra la especie en las actividades de una comunidad, haciendo a un lado los aspectos ambientales como lo propuso Grinnell. En 1957, Hutchinson propone su definición siendo la más aceptada hasta la actualidad, refiriéndose al nicho ecológico como el espacio n dimensional, en la que cada individuo responde a la variación de determinado factor de manera distinta (Mota-Vargasetal 2019).

Siendo la dualidad de Hutchinson el concepto más aceptado hasta la actualidad para entender los MNE, se reconoce que los modelos se generan en dos espacios: 1) El geográfico (bidimensional), ubicación geográfica de la presencia de las especies en estudio (latitud y longitud) así como la parte ambiental de la ubicación y 2) El ecológico o ambiental (multidimensional), el cual integra el aspecto ecológico representado por las variables ambientales (espacio n dimensional) (Soberón et al., 2017).

2.5 Diagrama BAM

El diagrama BAM fue diseñado por Soberón y Peterson (2005) para entender el funcionamiento de los MNE, representando el área de distribución de una especie (Figura 2). El círculo "A" engloba las condiciones ambientales necesarias para que la especie sobreviva y cumpla sus funciones básicas (nicho fundamental), el círculo "B" representa el factor biótico indispensable para la especie y por último el espacio "M" donde la especie ha podido presentarse; entre las uniones de

estos espacios se encuentran “G₀” (área ocupada por la especie) y “G₁” (área de interacción entre los factores bióticos y abióticos adecuados para la especie) (Pearson y Dawson, 2003).

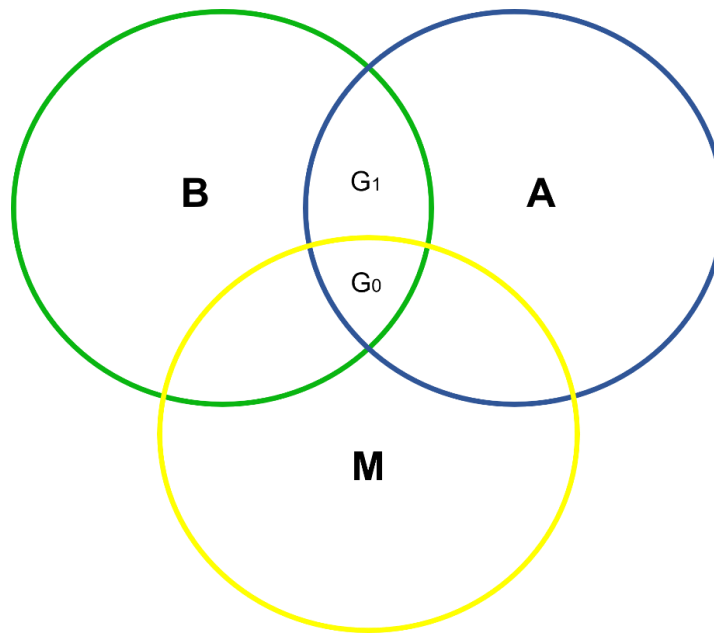


Figura 3. Representación del diagrama BAM, propuesto por Soberón y Townsend-Peterson (2005).

2.6 Modelos de nicho ecológico

Los MNE son algoritmos matemáticos cada vez más precisos, usados para realizar proyecciones de los nichos ecológicos en el escenario geográfico, utilizando valores ambientales y registros de presencia conocidos de las especies como elementos básicos para el procesamiento (Graham et al., 2004). Generan como resultado un mapa como en el nicho ecológico y su distribución potencial (Pulliam, 2000). Estos modelos como BioClim, GARP y MaxEnt (Phillips et al. 2006) se centran en distintos objetivos y analizan información como capas climáticas (BioClim), caracteres genéticos (GARP) o la máxima entropía (MaxEnt). Las características de cada algoritmo son distintas, por lo tanto, la selección del mejor algoritmo dependerá principalmente del tipo de datos que se tengan (Qiao et al., 2015)

En el caso de BioClim que utiliza capas climáticas para identificar un patrón similar que identifique las áreas con clima similar entre las especies, utiliza los

puntos dentro de este clima para proyectarlos a cada variable ambiental (Busby 1991). En el caso de MaxEnt (máxima entropía), genera predicciones a partir de información incompleta, estimando la distribución con mayor uniformidad sobre el área de estudio y extendiéndose a lo largo y ancho, buscando para cada variable ambiental una distribución que concuerde con su promedio efectivo (Phillips et al. 2004, 2006).

Elementos para modelar nichos ecológicos. Los registros se dividen en puntos de presencia y puntos de ausencia. Básicamente los puntos de presencia son las coordenadas geográficas (Longitud y latitud), donde se encuentra la especie en estudio. Para la obtención de esta información existen cuatro formas distintas, por obtención directa del campo, en literatura especializada, en colecciones científicas y en bases de datos disponibles en internet, por lo que un buen MNE dependería de la calidad de los registros geográficos para ello es recomendable depurar la información que sea dudosa basándose en literatura previa, así como la proyección de los mismos con ayuda de un SIG permitiendo visualizar los puntos para corroborar la presencia de la especie (Mota-Vargas et al. 2019). Es complicado asegurar la presencia de una especie en determinada área, por lo que los puntos de ausencia identifican estas zonas para cubrir la mayor parte de la distribución real (Anderson, 2003).

Las variables ambientales utilizadas para modelar el nicho ecológico se manejan principalmente con formatos raster o ASCII, esta información está conformada por matrices de condiciones conformadas en celdas o píxeles (Pearson y Dawson, 2003). Estos píxeles incluyen aspectos de información de la superficie del planeta, como altura, clima, salinidad del mar y otras características físicas y topográficas, incluyendo las variables bioclimáticas, esenciales para las proyecciones pasadas, actuales y futuras del comportamiento de las especies principalmente (Hijmans et al., 2005).

Validación de los modelos. Existen diferentes formas de evaluar los modelos para verificar que no arrojen información fuera de la realidad. La curva ROC (Receiver Operating Characteristic), permite obtener la significancia estadística

necesaria, basándose en la lejanía de los datos respecto al azar, siendo el método más común utilizado la curva ROC se obtiene automáticamente de los resultados arrojados del algoritmo MaxEnt (Phillips et al., 2006), midiendo el área bajo la curva, arrojando valores de 0 a 1, donde el valor más cercano a 1 indica un buen modelo de predicción (Peterson et al., 2008; Lobo et al., 2008).

2.9 Cambio Climático

La composición del clima en determinada región está conformada por distintos factores físicos que se establecen o permanecen estables durante largo tiempo, pero incluso dentro de la normalidad existe variabilidad climática, dando así las características distintivas que establecen el desarrollo de la vida en la Tierra distinto para cada ecosistema. Por lo tanto, el cambio climático afecta directamente en las poblaciones de los seres vivos, estas afectaciones pueden ser favorables o no para las especies dependiendo de las características adaptativas o capacidad de resiliencia que tengan ante situaciones de presión ambiental u otros factores. Los incrementos acelerados en las temperaturas que se pronostican para un futuro cercano se atribuyen a distintos factores, encabezado por las actividades antropogénicas, afectando en los sistemas de producción y de salud humana principalmente, debido al movimiento de las poblaciones de vectores o enfermedades. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) establece distintas categorías de daños a la salud que van desde olas de calor y desastres naturales a enfermedades causadas por alimentos, agua o vectores, agregando la parte socioeconómica de cada país, mencionando que son las consecuencias de mayor importancia sobre la población mundial (Torres et al. 2019).

El cambio climático es consecuencia del calentamiento global, en los últimos años se han observado distintos cambios, como el aumento de 1.09 °C de 1850 a 2020, aumento en las precipitaciones, eventos extremos cálidos con mayor frecuencia, eventos extremos fríos menos frecuentes pero más intensos, aumento de las olas de calor y sequías, por mencionar algunas, por lo tanto se

ha señalado que los daños en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas terrestres, de agua dulce y marinos han sido considerables, ocasionando que este deterioro sea irreversible (Sanz 2022).

2.10 Modelos climáticos

Los modelos climáticos son simulaciones físicas, químicas y biológicas de la atmósfera, la tierra y los océanos, los cuales se actualizan constantemente, se coordinan con el cronograma del IPCC y son a su vez coordinados por los Proyectos de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP), la última actualización se realizó en 2020 generándose el sexto informe de evaluación (AR6). Esta actualización muestra una sensibilidad climática mucho mayor a comparación con sus anteriores modelos del CMIP5. Uno de los principales conjuntos de simulaciones son los futuros, los cuales involucran factores en común como las acumulaciones de gases de efecto invernadero, aerosoles y otros forzamientos climáticos para proyectar lo que podría pasar en la Tierra a corto, mediano y largo plazo (Ayugi et al., 2021).

Los escenarios de emisiones son suposiciones de diferentes vías socioeconómicas llamadas "Vías socioeconómicas compartidas (SSP), las cuales en el CMIP5 eran conocidas como rutas de concentración representativas (RCP), las que examinaron diferentes emisiones futuras de gases de efecto invernadero, nombradas RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5, para la actualización CMIP6 cambiaron a SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP4-6.0 y SSP5-8.5, dando resultados de forzamiento radiativo de 2100 similares a los anteriores. Para esta actualización se integra otro escenario, SSP3-7.0, el cual se encuentra justo en medio del rango de resultados, por lo que ahora se podrán examinar el peor de los casos (SSP5-8.5), la mitad (SSP3-7.0) y los resultados más optimistas (SSP4-6.0) (Tebaldi et al. 2021).

Los SSP proyectan cinco opciones de futuro que podrían presentarse de acuerdo con el aumento de la temperatura para 2100, variando de un mínimo de 3.1 °C a un 5.1 °C por encima de los niveles preindustriales. Los factores socioeconómicos que se integran para el modelado son: la población, el

crecimiento económico, la educación, la urbanización y la tasa de desarrollo tecnológico (Figura 4) (Meinshausen et al. 2020). Las narrativas a las que se refiere cada SSP son: Sostenibilidad (SSP1) El camino más favorable; A medio camino (SSP2); Rivalidad regional (SSP3), Desigualdad (SSP4) un camino dividido, y Desarrollo impulsado por combustibles fósiles (SSP5) (Escoto et al., 2017; Riahi et al. 2017).

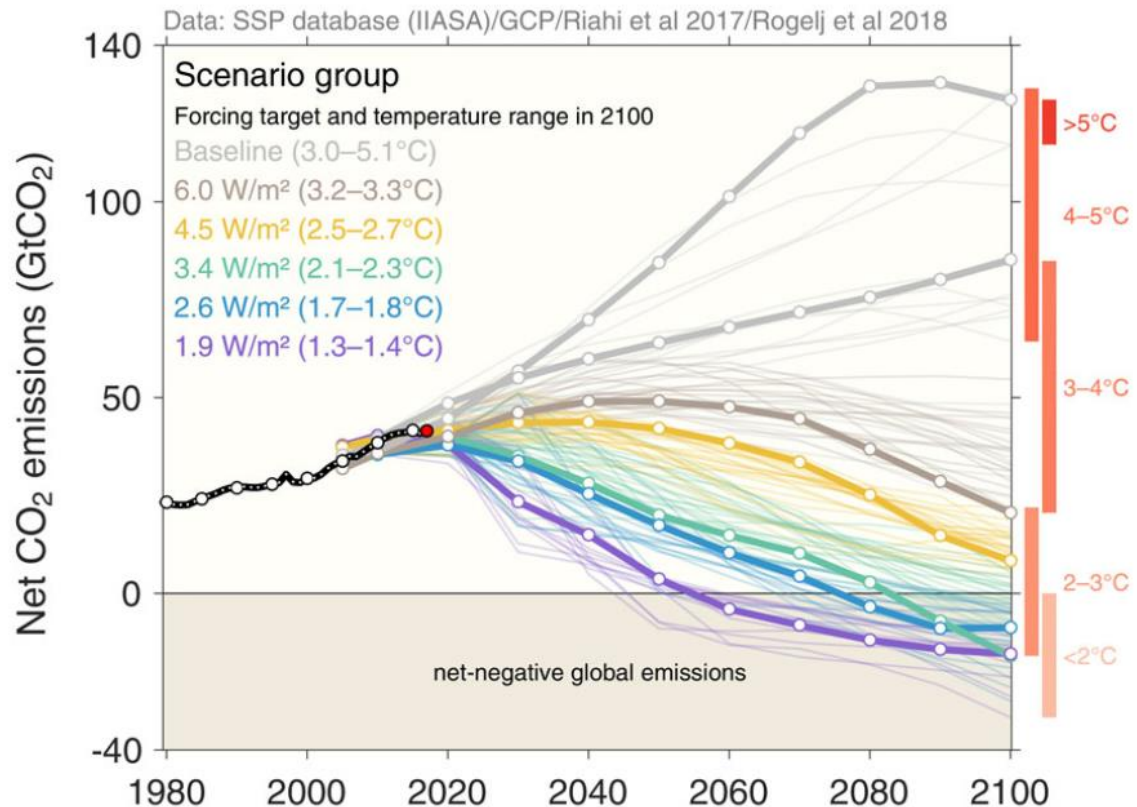


Figura 4. Emisiones globales de CO₂ (gigatoneladas, GtCO₂). Los escenarios de referencia sin política climática del SSP se muestran en gris, mientras que varios objetivos de mitigación se muestran en color. Las líneas en negritas indican el subconjunto de escenarios elegidos como enfoque para ejecutar las simulaciones del modelo climático de la CMIP6. Gráfico producido para Carbon Brief por Glen Peters y Robbie Andrews del Global Carbon Project.

Los diferentes modelos disponibles del CMIP6 son 40 hasta la fecha, pero se espera que sean alrededor de 100 y cada uno maneja niveles de sensibilidad climática de equilibrio (ESC) distintas, siendo éste el calentamiento esperado a

largo plazo, basándose en una duplicación de concentraciones atmosféricas de CO₂. Los resultados de catorce de estos modelos se muestran en amarillo, con un ECS superior a 4.5 °C, once con sensibilidades superiores a la del modelo más alto en CMIP5 y veintiséis presentan valores ECS consistentes con el AR5 (Figura 5) (Meehl et al. 2020).

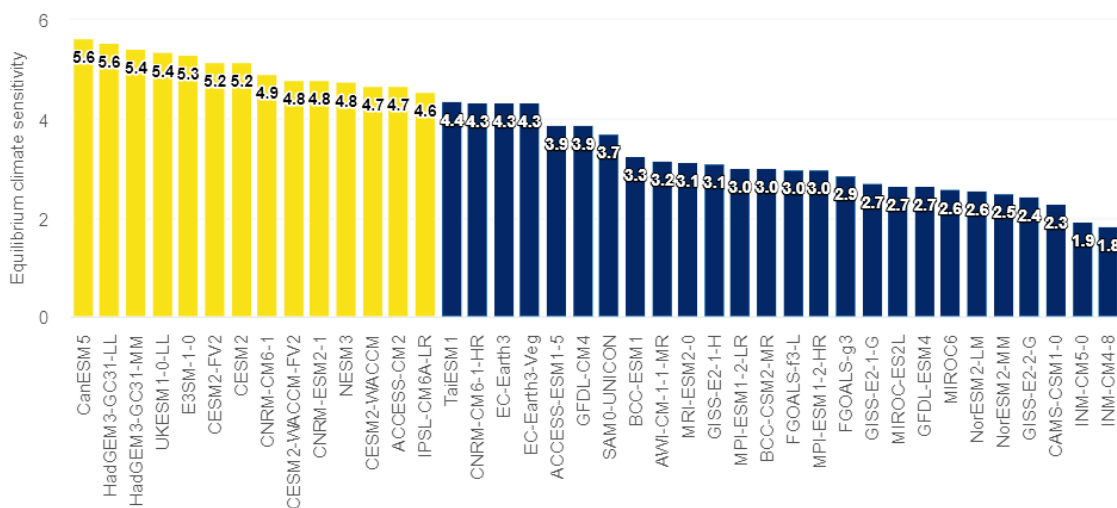


Figura 5. Valores ECS de los 40 modelos CMIP6 disponibles. Los modelos con un ECS por encima del rango probable IPCC AR5 se muestran en amarillo. Gráfico de Carbon Brief utilizando 2020.

LITERATURA CITADA

Ayugi, B., Zhihong, J., Zhu, H., Ngoma, H., Babaousmail, H., Rizwan, K., & Dike, V. (2021). Comparison of CMIP6 and CMIP5 models in simulating mean and extreme precipitation over East Africa. *International Journal of Climatology*, 41(15), 6474-6496.

Anderson R. P. (2003) Real vs. artefactual absences in species distributions: Tests for *Oryzomys albigularis* (Rodentia: Muridae) in Venezuela. *Journal of Biogeography* 30:591–605.

Araújo M. B. y Luoto M. (2007). The importance of biotic interactions for modelling species distributions under climate change. *Global Ecology and Biogeography* 16:743–753.

- Barata J. M. S. (1981). Aspectos morfológicos de ovos de triatomíneos. II. Características macroscópicas e exocoriais de dez espécies do genero *Rhodnius* Stal, 1859 (Hemiptera-Reduviidae). *Revista Saúde Públ São Paulo* 15: 490-542.
- Botero, D., & Restrepo, M. (2012). Parasitosis humanas. 5a ed. Corporación para investigaciones Biológicas CIB. Medellín, Colombia, pp. 275-313.
- Busby J. R. (1991). BIOCLIM – A bioclimate analysis and prediction system. In: Margules CR, Austin MP (eds.) *Nature conservation: Cost effective biological surveys and data analysis*. CSIRO, Melbourne, 64–68 pp.
- Carcavallo, R. U., Jurberg, J., Lent, H., Noireau, F., & Galvão, C. (2000). Phylogeny of the Triatominae (Hemiptera: Reduviidae). Proposals for taxonomic arrangements. *Entomología y Vectores*, 7(Suplemento 1):1-99.
- Costa, J., Peterson, A. T., & Beard, C. B. (2002). Ecological niche modeling and differentiation of populations of* *Triatoma brasiliensis** Neiva, 1911, the most important Chagas disease vector in northeastern Brazil (Hemiptera, Reduviidae, Triatominae). *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*. 67(5):516–520.
- de la Vega, G. J., Medone, P., Ceccarelli, S., Rabinovich, J., & Schilman, P. E. (2015). Geographical distribution, climatic variability and thermo-tolerance of Chagas disease vectors. *Ecography*, 38(8), 851-860.
- Eliosa León, H. R., Nieto Montes de Oca, A., & Navarro Carbajal, M. D. C. (2010). Conservadurismo filogenético del nicho ecológico un enfoque integral de la evolución. *Ciencias*, 98(098).
- Elton C. (1927). *Animal ecology*. Sedgwick and Jackson, Londres, Inglaterra.
- Escoto C., A., Sánchez Peña, L., & Gachuz Delgado, S. (2017). Shared Socioeconomic Pathways (SSP): New ways to assess climate and social change. *Estudios demográficos y urbanos*, 32(3), 669-693.
- Galvão, C., Carcavallo, R., Rocha, D. D. S., & Jurberg, J. (2003). A checklist of the current valid species of the subfamily Triatominae Jeannel, 1919 (Hemiptera, Reduviidae) and their geographical distribution, with nomenclatural and taxonomic notes. *Zootaxa*, 202(1), 1-36.

- Galvão C, De Paula A. (2014). Sistemática e evolução dos vetores. En: GALVÃO C, Organizador. Vetores da Doença de Chagas no Brasil. Sociedade Brasileira de Zoologia, Série Zoologia: guias e manuais de identificação. Curitiba, Brasil, pp. 26-32.
- Grinnell J. (1917). The niche relationship of the California Thrasher. *Auk* 34:427-433.
- Guisan A. y Zimmermann N. E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling* 135:147–186.
- Guhl, F., Aguilera, G., Pinto, N., & Vergara, D. (2007). Actualización de la distribución geográfica y ecoepidemiología de la fauna de triatominos (Reduviidae: Triatominae) en Colombia. *Biomédica*, 27(1), 143-162.
- Guhl, F. (2017). Geographical distribution of Chagas disease. In *American trypanosomiasis chagas disease* (pp. 89-112). Elsevier.
- Gurgel-Gonçalves, R., Galvao, C., Costa, J., & Peterson, A. T. (2012). Geographic distribution of Chagas disease vectors in Brazil based on ecological niche modeling. *Journal of tropical medicine*, 2012.
- Hijmans R. J., Cameron S., Parra J., Jones P. G., & Jarvis A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25:1965– 1978.
- Hypša, V., Tietz, D. F., Zrzavý, J., Rego, R. O., Galvao, C., & Jurberg, J. (2002). Phylogeny and biogeography of Triatominae (Hemiptera: Reduviidae): molecular evidence of a New World origin of the Asiatic clade. *Molecular phylogenetics and evolution*, 23(3), 447-457.
- Hutchinson E. G. (1957). Concluding Remarks. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology* 22:415–427.
- Ibarra-Cerdeña, C. N., Sánchez-Cordero, V., Peterson, A. T., & Ramsey, J. M. (2009). Ecology of north american triatominae. *Acta tropica*, 110(2-3), 178-186.
- Illoldi-Rangel, P. & Escalante, T. (2008). De los modelos de nicho ecológico a las áreas de distribución geográfica. *Biogeografía*, 3, 7-12.

- Justi, S. A., Russo, C. A., Mallet, J. R. D. S., Obara, M. T., & Galvão, C. (2014). Molecular phylogeny of Triatomini (Hemiptera: Reduviidae: Triatominae). *Parasites & vectors*, 7(1), 1-12.
- Kollien, A. H., & Schaub, G. A. (1998). Development of *Trypanosoma cruzi* after starvation and feeding of the vector—a review. *Tokai Journal of Experimental and Clinical Medicine*. 23(6), 335-40.
- Kovats, R. S., Campbell-Lendrum, D. H., McMichel, A. J., Woodward, A., & Cox, J. S. H. (2001). Early effects of climate change: do they include changes in vector-borne disease? *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 356(1411), 1057-1068.
- Karger D. N., Conrad O., Böhner J., Kawohl T., Kreft H., Soria-Auza R. W., Zimmermann N. E., Linder H. P., Kessler M. (2017). Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Scientific Data* 4:170122.
- Lee, B. Y., Bacon, K. M., Bottazzi, M. E., & Hotez, P. J. (2013). Global economic burden of Chagas disease: a computational simulation model. *The Lancet infectious diseases*, 13(4), 342-348.
- Lent, H., & Wygodzinsky, P. (1979). Revision of the Triatominae (Hemiptera, Reduviidae), and their significance as vectors of Chagas' disease. *Bulletin of the American museum of Natural History*, 163(3), 123-520.
- Meehl, G. A., Senior, C. A., Eyring, V., Flato, G., Lamarque, J. F., Stouffer, R. J., Taylor K. E. & Schlund, M. (2020). Context for interpreting equilibrium climate sensitivity and transient climate response from the CMIP6 Earth system models. *Science Advances*, 6(26), eaba1981.
- Meinshausen, M., Nicholls, Z. R. J., Lewis, J., Gidden, M. J., Vogel, E., Freund, M., Beyerle, U., Gessner, C., Nauels, A., Bauer, N., Canadell, J. G., Daniel, J. S., John, A., Krummel, P. B., Luderer, G., Meinshausen, N., Montzka, S. A., Rayner, P. J., Reimann, S., Smith, S. J., van den Berg, M., Velders, G. J. M., Vollmer, M. K., and Wang, R. H. J. (2020). The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500, Geosci. *Geoscientific Model Development*, 13(8), 3571-3605. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3571-2020>.

- Mota-Vargas, C., Encarnación Luévano, A., Ortega Andrade, H. M., Prieto Torres, D. A., Peña Peniche, A., & Rojas Soto, O. R. (2020). Una breve introducción a los modelos de nicho ecológico. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Otálora-Luna, F., Pérez-Sánchez, A. J., Sandoval, C., & Aldana, E. (2015). Evolution of hematophagous habit in Triatominae (Heteroptera: Reduviidae). *Revista chilena de historia natural*, 88(1), 1-13.
- Organización Mundial de la Salud. (2020). Enfermedades transmitidas por vectores. Disponible en línea en: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs387/es/> (Acceso: 24-04-21).
- Organización Mundial de la Salud. (2021). La enfermedad de Chagas (tripanosomiasis americana). Disponible en línea en: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs340/es/> (Acceso 24-04-21).
- Pearson R. G., Dawson T. P. (2003). Predicted the impacts of climate change on the distribution of species: Are bioclimate envelop models useful? *Global Ecology and Biogeography* 12:361–371.
- Peterson A. T., & Soberón J. (2012). Species distribution modeling and ecological niche modeling: Getting the concepts right. *Natureza & Conservação* 10:102-107.
- Pulliam H. R. (2000). On the relationship between niche and distribution. *Ecology Letters* 3:349–361.
- Qiao H., Soberón J., & Peterson A. T. (2015). No silver bullets in correlative ecological niche modelling: insights from testing among many potential algorithms for niche estimation. *Methods in Ecology and Evolution* 6:1126-1136.
- Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer N., Calvin K., Dellink R., Fricko O., Lutz W., Popp A., Cuaresma J. C., KC S., Leimbach M., Jiang L., Kram T., Rao S., Emmerling J., Ebi K., Hasegawa T., Havlik P., Humpenöder F., Da Silva L. A., Smith S., Stehfest E., Bosetti V., Eom J., Gernaat D., Masui T., Rogelj J., Strefler J., Drouet L., Krey V., Luderer G., Harmsen M., Takahashi K., Baumstark L., Doelman

- J. C., Kainuma M., Klimont Z., Marangoni G., Lotze-Campen H., Obersteiner M., Tabeau A. & Tavoni, M. (2017). The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. *Global environmental change*, 42, 153-168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>.
- Rivero I. (2016). Enfermedad de Chagas. *Revista Médica de Costa Rica y Centroamérica*. 83 (619): 297-301p.
- Ruggiero, M. A., Gordon, D. P., Orrell, T. M., Bailly, N., Bourgoïn, T., Brusca, R. Cavalier-Smith T., Guiry M & Kirk, P. M. (2015). A higher level classification of all living organisms. *PloS one*, 10(4), e0119248.
- Sandoval-Ruiz, C. A., Zumaquero-Rios, J. L., & Rojas-Soto, O. R. (2014). Predicting geographic and ecological distributions of triatomine species in the southern Mexican state of Puebla using ecological niche modeling. *Journal of Medical Entomology*, 45(3), 540-546.
- Sanz, M. J. (2022). La adaptación al cambio climático ya es ineludible. *Revista de Salud Ambiental*, 22(Especial Congreso), 80-81.
- Schofield C. J. (1994). Triatominae. Biología y Control. *Eurocommunica Publications*. UK. 77 pp.
- Schofield, C. J., & Galvão, C. (2009). Classification, evolution, and species groups within the Triatominae. *Acta tropica*, 110(2-3), 88-100.
- Soberón J., Osorio-Olvera L., & Peterson T. (2017). Diferencias conceptuales entre modelación de nichos y modelación de áreas de distribución. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 88:437–441.
- Sorensen J., Campbell B., Gill R. & Steffen-Campbell J. (1995). Non-monophyly of Auchenorrhyncha ("Homoptera"), based upon 18S rDNA phylogeny: eco-evolutionary and cladistic implications with pre-Heteropteroidea Hemiptera (s.l.) and a proposal for new monophyletic suborders. *Pan-Pacific Entomologist*. 71(1):31-60.
- Stockwell D. & Peters D. (1999). The GARP modelling system: problems and solutions to automated spatial prediction. *International Journal of Geographical Information Science* 13: 143–158.

- Tebaldi, C., Debeire, K., Eyring, V., Fischer, E., Fyfe, J., Friedlingstein, P., Knutti, R., Lowe, J., O'Neill, B., Sanderson, B., van Vuuren, D., Riahi, K., Meinshausen, M., Nicholls, Z., Tokarska, K. B., Hurtt, G., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Meehl, G., Moss, R., Bauer, S. E., Boucher, O., Brovkin, V., Byun, Y.-H., Dix, M., Gualdi, S., Guo, H., John, J. G., Kharin, S., Kim, Y., Koshiro, T., Ma, L., Olivié, D., Panickal, S., Qiao, F., Rong, X., Rosenbloom, N., Schupfner, M., Séférian, R., Sellar, A., Semmler, T., Shi, X., Song, Z., Steger, C., Stouffer, R., Swart, N., Tachiiri, K., Tang, Q., Tatebe, H., Voldoire, A., Volodin, E., Wyser, K., Xin, X., Yang, S., Yu, Y., & Ziehn, T. (2021). Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) of CMIP6. *Earth System Dynamics* 12(1), 253-293. <https://doi.org/10.5194/esd-12-253-2021>.
- Torres, M. A. F., Ceballos, M. C., González, L. M. D., & Dutil, M. V. (2019). Efectos del cambio climático en la salud. *Revista Información Científica*, 98(2), 272-282.
- Weirauch, C., Bérenger, J. M., Berniker, L., Forero, D., Forthman, M., Frankenberg, S., Freedman A., Gordon E., Hoey-Chamberlain R., Hwang W., Marshall S., Michael A., Paiero S., Udah O., Watson C., Yeo M., Zhang G. & Zhang, J. (2014). An illustrated identification key to assassin bug subfamilies and tribes (Hemiptera: Reduviidae). *Canadian Journal of Arthropod Identification*, 26(2), 1-115.
- World Health Organization. (2012). Research priorities for Chagas disease, human African trypanosomiasis and leishmaniasis. World Health Organization. *Technical Report Series*. 975:1-100.
- World Health Organization. (2015). Chagas disease in Latin America: an epidemiological update based on 2010 estimates. *Weekly Epidemiological Record= Relevé épidémiologique hebdomadaire*, 90(06), 33-44.

CAPÍTULO 1. REVISIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN Y ECOLOGIA DE LAS ESPECIES DEL GÉNERO *Triatoma* (HEMIPTERA: REDUVIIDAE) EN AMÉRICA

INTRODUCCIÓN

A partir del descubrimiento de la enfermedad de Chagas, diversos documentos de revisión sobre esta temática han sido publicados (Olivier et. al. 1972), de los cuales relativamente son pocos con el presente enfoque. La tripanosomiasis americana es una de las enfermedades reemergentes que continúan generando millones de infecciones anuales en los 21 países de Latinoamérica (Ramsey et al. 2015). Actualmente, la subfamilia Triatominae está constituida por 150 especies validadas en todo el mundo (Galvão y De Paula 2014, Ghul, 2017). El género *Triatoma* es el de mayor importancia médica debido a la cantidad de especies y su amplia distribución. Hasta 2018 se tenían reportadas para todos los estados un total de 27 especies, por lo que después de Brasil, México es el país con mayor diversidad de triatomas (Carmona-Castro et. al. 2018). Dentro de la gran diversidad de hábitat que se presentan, se generan las condiciones adecuadas que promueven la adaptación de las chinches y aumenta la transmisión del parásito, principalmente en regiones rurales donde el nivel socioeconómico es bajo (Cruz-Reyes y Pickering-López 2006).

En este contexto, se ha reportado que el clima influye en las distribuciones de las especies, debido a sus requerimientos relacionados con la temperatura y la humedad (Parmesan y Yohe 2003; Root et. al., 2005; Walther et. al., 2005; Lavergne et. al., 2006). Esto queda plasmado en el concepto de nicho propuesto por Grinnell (1917), quien menciona que a gran escala el clima rige la distribución de las especies. Desde este enfoque, se asume que las especies colonizarán zonas geográficas que contengan requerimientos climáticos similares a los de su rango nativo (conservadurismo de nicho) (Wiens, 2010). De esta manera la respuesta de las especies ante las variaciones climáticas no siempre será unidireccional, debido a que habrá especies que presenten una respuesta negativa y otras con respuestas positivas ante dichas variaciones ambientales (Carcavallo, 1999). El presente documento muestra los resultados de la revisión

de literatura sobre la distribución y ecología de las especies del género *Triatoma* en América y especifica cómo estos estudios previos pueden utilizarse para comprender la relación de los factores ambientales con la distribución espacial.

DISTRIBUCIÓN

El género *Triatoma* es el más diverso y con mayor rango de distribución desde Estados Unidos hasta la Patagonia (Lent y Wygodzinssky 1979), se distribuyen en América desde el paralelo 43° al Norte (Sur de E.U.) hasta el paralelo 49° de latitud sur (Argentina) y hasta una altitud de 2000 msnm, principalmente (Rey, 1972). La cantidad de especies que agrupa el género *Triatoma* hasta la fecha sigue siendo controversial entre los taxónomos, debido a que estudios moleculares han agrupado y separado constantemente a los complejos del género (35 especies sin contar subespecies) (Lent y Wygodzink, 1979, Tay et al., 1992, Zarate y Zarate, 1985, Salazar-Schetino et al., 1988). Hay dos factores importantes en la distribución de los Triatominae: primero, el grupo es principalmente tropical y subtropical, y segundo, está restringido al hemisferio occidental y a la región oriental, encontrándose completamente ausente de las regiones paleártica y etiópica, sin considerar a *Triatoma rubrofasciata*, especie dispersada por el hombre que toca marginalmente la región australiana. Las regiones tropicales y subtropicales de Sur América son el centro de la diversidad de la subfamilia (Gorla, et al. 1997). En Estados Unidos se reporta sólo *Triatoma sanguisuga* (Leconte, 1855), una especie restringida únicamente a esa zona; Estados Unidos y México comparten 13 especies, en la región Neotropical de México se ubican 19 especies (Beard et al. 2003; Reisenman et al. 2010; Ramsey et al. 2015). La especie de mayor distribución es *Triatoma dimidiata*, alcanzando zonas desde el centro de México hasta el Ecuador (Hotez et al. 2008, Gómez-Palacio et al. 2015).

Lent y Wygodzinssky (1979) reportaban en México 21 especies del género *Triatoma*, basándose principalmente en la sistemática morfológica y señalaban que era imposible realizar un análisis significativo de la biogeografía en ese entonces debido a que no se había desarrollado un sistema cladístico de Triatominae, posteriormente Zárate y Zárate en 1985 reportaron 27 especies, los

estados con mayor cantidad de especies registradas eran Nayarit (7), Sonora (7), Chihuahua (8) y Jalisco (8), de las cuales sólo 18 especies se presentaban parasitadas por *T. cruzi*. Los triatominos con mayor incidencia hasta 1985 eran *T. barberi* y *T. dimidiata* registradas en 12 estados, siendo esta última el vector más importante en México (Lent y Wygodzinssky 1979; Zárate y Zárate 1985). La cantidad total de especies ha variado con el tiempo de acuerdo con distintos reacomodos en la taxonomía y por cuestiones moleculares, partiendo de solo 27 especies (Zárate and Zárate 1985, Bautista et al. 1999). Actualmente se reconocen 31 especies autóctonas y todas se han encontrado parasitadas naturalmente por *T. cruzi*, 19 especies han sido constantemente encontradas invadiendo casas habitación y 12 son especies selváticas, siendo encontradas ocasionalmente en asociación con humanos (Ramsey et. al. 2015).

Para el estado de Jalisco se reportan, ocho especies de triatominos: *Triatoma barberi* Usinger, *T. brailovskyi* Martínez, Carcavallo & Peláez, *T. dimidiata* Latreille, *T. longipennis* Usinger, *T. mazzotti* Usinger, *T. pallidipennis* Stål, *T. phyllosoma* Burmeister y *T. picturata* Usinger (Magallón-Gastélum 1998; Brenière et al. 2007). Las especies concuerdan con lo reportado por Lent and Wigodzinsski (1979) y Zárate y Zárate (1985), a excepción de *T. brailovskyi* la cual fue reportada posteriormente (Martínez et al. 1984). El primer reporte de *T. pallidipennis* en el estado de Guanajuato fue realizado por Biagi en 1956 (López-Cárdenas et al. 2005). Posteriormente Cárdenas et al. (2002) reportaron para el estado de Guanajuato cinco especies *T. barberi*, *T. mexicana*, *T. longipennis*, *T. pallidipennis* y *T. dimidiata*, siendo *T. barberi* la que presentó el 60% de incidencia en la totalidad de los municipios. Rodríguez-Bataz et al. (2011), señalan que *T. barberi* y *T. dimidiata* se encuentran presentes en 18 localidades del estado de Guerrero, representando un 54.5% respecto al índice de dispersión. Para el estado de Colima se han registrado cinco especies de Triatominae: *T. pallidipennis* Stål, 1872, *T. longipennis*, Usinger, 1939, *T. picturata*, Usinger, 1939, *T. barberi*, Usinger, 1939 y *T. brailovskyi*, Martínez, 1984 (Espinoza-Gómez et al. 2002). En el estado de Durango se registran las especies *T. phyllosoma* y *T. protracta* en 2006 (Cruz-Reyes y Pickering-López 2006), posteriormente se

reportan *T. longipennis* y *T. recurva* en dos municipios Mezquital y Pueblo Nuevo (Martínez-Ibarra et al. 2012), reportadas también en los estados vecinos de Nayarit, Chihuahua y Sinaloa, bajo condiciones climáticas similares (Salazar-Schettino et al., 2010).

En el estado de Nuevo León se reporta el desplazamiento de *T. gerstaeckeri* a nuevas áreas y se considera que la especie tiene la capacidad de traslaparse con la distribución de otras especies como *T. sanguisuga* (Leconte), *T. indictiva* Usinger, *T. lecticularia* y *T. protracta* (Kjols et al. 2009; Martínez-Tovar et al. 2013). Sandoval-Ruiz et al. (2012) mencionan que *T. gerstaeckeri* se ha reportado en los estados de Chihuahua, Coahuila, Hidalgo, Nuevo León, Querétaro, San Luis Potosí, Sinaloa, Tamaulipas, Veracruz y Zacatecas. Específicamente para el estado de Nuevo León, hasta ahora se han reportado las especies *T. gerstaeckeri*, *T. lecticularia*, *T. neotomae* y *T. protracta* (Zárate y Zárate 1985, Cruz-Reyes y Pickering 2006). El hallazgo de *T. rubida* en Coahuila se realizó por primera vez en 2013 (Martínez-Tovar et al. 2013)

Cuadro 1. Especies del género *Triatoma* presentes en los estados de mexicanos, modificado y actualizado de Cruz-Reyes y Pickering-López (2006).

Estado	Especie
Aguascalientes	<i>Triatoma phyllosoma</i> *; <i>T. longipennis</i> *
BCN	<i>T. protracta</i> ; <i>T. rubida</i>
BCS	<i>T. peninsularis</i> *; <i>T. protracta</i> ; <i>T. rubida</i> *
Campeche	<i>T. dimidiata</i>
Coahuila	<i>T. gerstaeckeri</i> *; <i>T. protracta</i> *; <i>T. rubida</i>
Colima	<i>T. barberi</i> ; <i>T. bolivari</i> ; <i>T. brailovskyi</i> ; <i>T. longipennis</i> ; <i>T. pallidipennis</i> *; <i>T. picturata</i>
Chiapas	<i>T. dimidiata</i> , <i>T. longipennis</i> *
Chihuahua	<i>T. gerstaeckeri</i> ; <i>T. indictiva</i> ; <i>T. longipennis</i> ; <i>T. protracta</i> ; <i>T. recurva</i> ; <i>T. rubida</i> ; <i>T. sanguisuga</i>
Distrito Federal	<i>T. barberi</i> ; <i>T. pallidipennis</i>
Durango	<i>T. phyllosoma</i> ; <i>T. protracta</i> *; <i>T. longipennis</i> y <i>T. recurva</i>
Edo. de México	<i>T. incrassata</i> ; <i>T. pallidipennis</i> *; <i>T. sanguisuga</i>

Guanajuato	<i>T. barberi</i> ; <i>T. dimidiata</i> ; <i>T. longipennis</i> ; <i>T. mexicana</i> *; <i>T. pallidipennis</i>
Guerrero	<i>T. barberi</i> *; <i>T. dimidiata</i> *; <i>T. mazzottii</i> *; <i>T. pallidipennis</i> *; <i>T. phyllosoma</i> *; <i>T. recurva</i> *; <i>T. rubida</i>
Hidalgo	<i>T. barberi</i> *; <i>T. dimidiata</i> *; <i>T. gerstaeckeri</i> ; <i>T. mexicana</i> *
Jalisco	<i>T. barberi</i> *; <i>T. bolivari</i> ; <i>T. brailovskyi</i> ; <i>T. dimidiata</i> *; <i>T. longipennis</i> *; <i>T. mazzottii</i> *; <i>T. pallidipennis</i> *; <i>T. picturata</i>
Michoacán	<i>T. barberi</i> *; <i>T. mazzottii</i> *; <i>T. pallidipennis</i> *; <i>T. recurva</i>
Morelos	<i>T. pallidipennis</i> ; <i>T. barberi</i> *
Nayarit	<i>T. bolivari</i> ; <i>T. brailovskyi</i> ; <i>T. dimidiata</i> ; <i>T. longipennis</i> *; <i>T. mazzottii</i> *; <i>T. phyllosoma</i> *; <i>T. picturata</i> *; <i>T. recurva</i> ; <i>T. rubida</i> *
Nuevo León	<i>T. gerstaeckeri</i> *; <i>T. lecticularia</i> *; <i>T. neotomae</i> *; <i>T. protracta</i> *; <i>T. rubida</i>
Oaxaca	<i>T. barberi</i> *; <i>T. bolivari</i> ; <i>T. dimidiata</i> *; <i>T. gerstaeckeri</i> *; <i>T. longipennis</i> *; <i>T. mazzottii</i> *; <i>T. nitida</i> ; <i>T. pallidipennis</i> *; <i>T. phyllosoma</i> *; <i>T. picturata</i> *
Puebla	<i>T. barberi</i> ; <i>T. bassolsae</i> *; <i>T. dimidiata</i> ; <i>T. pallidipennis</i> *
Querétaro	<i>T. barberi</i> *; <i>T. mexicana</i>
Quintana Roo	<i>T. dimidiata</i> *; <i>T. hegneri</i> *
San Luis Potosí	<i>T. dimidiata</i> *; <i>T. gerstaeckeri</i> ; <i>T. mexicana</i> ; <i>T. pallidipennis</i> *; <i>T. protracta</i>
Sinaloa	<i>T. indictiva</i> ; <i>T. longipennis</i> ; <i>T. phyllosoma</i> ; <i>T. protracta</i> *; <i>T. recurva</i> *; <i>T. rubida</i> *; <i>T. sanguisuga</i> ; <i>T. sinaloensis</i> *
Sonora	<i>T. incrassata</i> ; <i>T. longipennis</i> *; <i>T. protracta</i> ; <i>T. recurva</i> *; <i>T. rubida</i> *; <i>T. sinaloensis</i> *
Tabasco	<i>T. dimidiata</i> *
Tamaulipas	<i>T. gerstaeckeri</i> *; <i>T. neotomae</i> ; <i>T. protracta</i> *
Tlaxcala	<i>T. barberi</i> *
Veracruz	<i>T. barberi</i> ; <i>T. dimidiata</i> *; <i>T. gerstaeckeri</i> ; <i>T. pallidipennis</i>
Yucatán	<i>T. dimidiata</i> *; <i>T. longipennis</i> ; <i>T. nitida</i> *
Zacatecas	<i>T. longipennis</i> *; <i>T. pallidipennis</i> ; <i>T. phyllosoma</i> *; <i>T. protracta</i>

*Especies infectadas naturalmente por *T. cruzi*

En Colombia, *Triatoma venosa* y *Triatoma maculata* se han adaptado a los ecotopos domiciliarios, pero tienen sólo importancia secundaria (Carcavallo 1999, Guhl et al. 2007). Según Molina et al. (2000) el principal factor que delimita la distribución de estas especies está relacionado con la altitud de 2000 msnm. Para este año también reportaron por primera vez a *Triatoma nigromaculata* en el departamento del Cauca, donde anteriormente ya se había señalado el movimiento en su distribución con base en la presencia en países vecinos, por

los cambios ambientales y el aumento en las migraciones poblacionales; de igual manera, se destacó el primer reporte de *T. dimidiata* en la isla de Providencia (Gualdrón et al., 2001). En Perú, *Triatoma infestans* es una especie muy abundante en los focos meridionales. En Bolivia y Paraguay *T. infestans* se encuentra ampliamente dispersa. *T. sordida* se encuentra distribuida en la parte oriental de Bolivia y en una amplia zona de Brasil como también en zonas de Argentina, Paraguay y Uruguay. Sin embargo, el vector más importante en Argentina, Bolivia, Uruguay y Chile es *T. infestans*. En Brasil esta especie se había estado desplazando hacia el Norte y recientemente ha alcanzado en el noreste los estados de Pernambuco y Paraíba, luego de ser erradicada de muchos estados de este país, *Triatoma brasiliensis* paso a ser el principal vector en la zona Noreste (Lent y Wygodzink, 1979; Guarneri et al. 2003).

ECOLOGÍA

De acuerdo con las necesidades biológicas y ecológicas de los triatomíneos y según el grado de asociación vector-hombre, cada una de las 150 especies descritas se incluyen en tres grupos principales selváticos, peridomésticos y domésticos (Ghul, 2017). El primer grupo incluye especies que son encontradas únicamente en ambientes silvestres y se alimentan de sangre de animales endotermos no domesticados, como los monos, roedores, aves, comadrejas, etc, o en algunos casos de sangre de animales ectotermos, tales como ciertos reptiles. Estas especies parecerían tener escasa importancia epidemiológica en la transmisión vectorial de la enfermedad de Chagas, ya que su contacto con el ser humano es escaso (accidental) o nulo. El segundo grupo, intermedio en cuanto al nivel de vínculo con el hombre, comprende especies de triatomíneos que se encuentran en ambientes silvestres, aunque también son comúnmente encontradas en el interior o en los alrededores de construcciones humanas. Por último, se pueden encontrar especies casi o exclusivamente asociadas al hombre, que viven tanto en el domicilio como en el peridomicilio, alimentándose en gran medida de sangre humana, además de la de los animales domesticados por el hombre.

Las características biológicas que se mencionan con mayor incidencia en los documentos fueron en promedio general, para las distintas especies: Oviposición de huevecillos: 200-1000, Temperatura media: 25-32 °C; Humedad relativa promedio: 50 a 80% y Altitud: 0-2400 msnm (Velasco-Castrejon y Rivas-Sánchez 2008). Según Guzmán-Marín (1990), Ramsey et. al. (2003), Ibarra-Cerdaña, et. al. (2009) y Klotz, et. al. (2016), los factores que más influyen para la presencia de las especies de *Triatoma* son la destrucción del hábitat, las condiciones de la vivienda (material de adobe), la presión poblacional y los factores climáticos. La destrucción del hábitat provoca que los reservorios silvestres queden expuestos, por lo que la zona de distribución se acerca a las casas donde los animales de traspatio y las personas quedan expuestas a la transición del patógeno.

Los factores climáticos siguen siendo una de las barreras naturales para la delimitación de la distribución de las especies, pero ligado al cambio climático y los factores anteriores, las especies se ven forzadas a las adaptaciones, llegando a zonas donde anteriormente no se encontraban. Se ha demostrado que la temperatura es un factor de suma importancia en la biología y distribución de las especies. Neiva en 1913, demostró que el incremento de la temperatura acelera el período embrionario de *T. infestans*. Según Zeledón et al., 1970, Carcavallo, 1999 y Carmona-Castro et al., 2018, señalan que la temperatura afecta directamente en el ciclo biológico, la alimentación y los hábitos de las especies del género *Triatoma*.

Como se mencionó anteriormente, los triatominos se alimentan casi exclusivamente de sangre de animales endotermos, con quienes viven en íntimo contacto, ya sean salvajes, domésticos o el hombre. En general, eligen refugios constituidos característicamente por lugares estrechos, cercanos al dormitorio de sus hospedadores. La mayoría de las especies de triatominos estudiadas hasta el momento en cuanto a su biología muestran hábitos preferentemente nocturnos. Durante el día permanecen en el interior de sus refugios, en íntimo contacto con el sustrato y agregados con sus conespecíficos (Lorenzo Figueiras et al. 1994), en estado akinético o de inmovilidad prolongada. Esta tendencia tigmotáctica, junto con su tendencia a la evitación de luz o fototaxis negativa

(Reisenman y Lazzari 1996) y el ritmo diario de sensibilidad a olores del hospedador (Barrozo et al. 2004), resguardan los hábitos nocturnos de estos insectos y evitan su exposición, los refugios suelen ser estrechos y profundos, por lo general, lugares con poco acceso de luz. Además, el ritmo endógeno de actividad locomotora (Lazzari 1991) los mantiene casi inactivos durante el transcurso del día, mientras que el ritmo diario de sensibilidad al dióxido de carbono (Barrozo et al. 2004) reduce las posibilidades de que la cercanía de un hospedador las induzca a abandonar sus refugios durante el día y exponerse a la depredación. Sin embargo, durante la noche se vuelven activos, coincidentemente con la oscuridad en el exterior de sus refugios, la máxima motivación para caminar dictada por su ritmo diario de actividad locomotora y la máxima capacidad de percibir el dióxido de carbono, señal asociada a sus hospedadores. Así, salen de sus refugios al comienzo de la noche (Lorenzo y Lauari 1996) en búsqueda de alimento, obteniéndolo relativamente fácil, debido a la habitual cercanía entre el refugio y el hospedador, aprovechando además el reposo de sus hospedadores. Para localizar su alimento, utilizan sensores químicos para percibir el CO₂, ácido láctico, ácidos grasos, etc. (Guerenstein y Guerin 2001, Barrozo y Lauari 2004), o físicos como el calor y humedad (Lauari y Núñez 1989, Flores y Lauari 1996, Barrozo et al. 2003), vibraciones, etc., emitidas por el hospedador. Hacia el final de la noche, y luego de alimentarse, retoman a sus refugios, localizándolos a través de claves químicas de agregación presentes en las heces secas (Lorenzo Figueiras 1994, Lorenzo y Lazzari 1996) depositadas alrededor de sus entradas.

Factores que promueven la presencia

Dujardin et al. (2000), plantean que la adaptación de los Triatominae desde su hábitat silvestre a peri domésticos o domésticos parece ser una característica primaria de la evolución actual del grupo. Según Guzmán-Marín (1990), Ramsey et. al. (2003), Ibarra-Cerdaña, et. al. (2009) y Klotz, et. al. (2016), los factores que más influyen para la presencia de las especies de *Triatoma* son la destrucción del hábitat, las condiciones de la vivienda, la presión poblacional y los factores climáticos. La destrucción de hábitat provoca que los reservorios silvestres

queden expuestos, por lo que la zona de distribución se acerca a las casas donde los animales de traspatio y las personas quedan expuestas a la transición del patógeno.

Las condiciones de la vivienda siendo en su mayoría de barro y materiales que guardan la humedad y disminuyen la temperatura, generan un microclima adecuado para las chinches, así también las grietas que se forman en las paredes de las casas de forma interna y externa son lugares idóneos para la oviposición. Durante generaciones la presión poblacional se ha ido incrementando, debido a la demanda de recursos y ligado a la destrucción del hábitat, las chinches por el instinto de sobrevivir han modificado sus hábitos y se están adaptando a lugares artificiales que les propician refugio, alimento y condiciones ideales para la reproducción. Por último, los factores climáticos siguen siendo una de las barreras naturales para la delimitación de la distribución de las especies, pero ligado al cambio climático y los factores anteriores, las especies se ven forzadas a las adaptaciones llegando a zonas donde anteriormente no se encontraban.

Literatura citada

- Beard, C. B., Pye, G., Steurer, F. J., Rodríguez, R., Campman, R., Peterson, A. T., Ramsey, J., Wirtz, R. A. & Robinson, L. E. (2003). Chagas disease in a domestic transmission cycle in southern Texas, USA. *Emerging Infectious Diseases*, 9: 103-105.
- Brenière, S. F., Bosseno, M. F., Magallón-Gastelúm, E., Ruvalcaba, E. G. C., Gutierrez, M. S., Luna, E. C. M., Basulto, J.T. Mathieu-Daudé F., Walter A. & Lozano-Kasten, F. (2007). Peridomestic colonization of *Triatoma longipennis* (Hemiptera, Reduviidae) and *Triatoma barberi* (Hemiptera, Reduviidae) in a rural community with active transmission of *Trypanosoma cruzi* in Jalisco state, Mexico. *Acta tropica*, 101(3), 249-257.
- Bautista, N. L., de la Torre, G. S. G., Arteaga, I. D. H., & Salazar Schettino, P. M. (1999). Importance of *Triatoma pallidipennis* (Hemiptera: Reduviidae) as a vector of *Trypanosoma cruzi* (Kinetoplastida: Trypanosomatidae) in the

- state of Morelos, Mexico, and possible ecotopes. *Journal of medical entomology*, 36(3), 233-235.
- Cárdenas, J. L., Bravo, F. E. G., & Schettino, P. M. S. (2002). Distribución Espacial de Vectores de la Enfermedad de Chagas en el Estado de Guanajuato 1998-2000. *Acta Universitaria*, 12(3), 64-69.
- Carmona-Castro, O., Moo-Llanes, D. A., & Ramsey, J. M. (2018). Impact of climate change on vector transmission of *Trypanosoma cruzi* (Chagas, 1909) in North America. *Medical and veterinary entomology*, 32(1), 84-101.
- Carcavallo, R. U. (1999). Climatic factors related to Chagas disease transmission. *Memorias Do Instituto Oswaldo Cruz*, 94, 367-369.
- Cruz-Reyes, A., & Pickering-López, J. M. (2006). Chagas disease in Mexico: an analysis of geographical distribution during the past 76 years-A review. *Memorias do Instituto Oswaldo Cruz*, 101(4), 345-354.
- Espinoza-Gómez, F., Maldonado-Rodríguez, A., Coll-Cárdenas, R., Hernández-Suárez, C. M., & Fernández-Salas, I. (2002). Presence of triatominae (Hemiptera, Reduviidae) and risk of transmission of Chagas disease in Colima, Mexico. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, 97(1), 25-30.
- Galvão C & De Paula A. (2014). Sistemática e evolução dos vetores. *En: GALVÃO C, Organizador. Vetores da Doença de Chagas no Brasil. Sociedade Brasileira de Zoologia, Série Zoologia: guias e manuais de identificação. Curitiba, Brasil, pp. 26-32.*
- Gorla, D. E.; Dujardin, J. P. & Schofield, C. J., (1997). Biosystematics of Old World Triatominae. *Acta Tropica*, 63(2-3):127-140.
- Gómez-Palacio, A., Arboleda, S., Dumonteil, E., & Peterson, A. T. (2015). Ecological niche and geographic distribution of the Chagas disease vector, *Triatoma dimidiata* (Reduviidae: Triatominae): Evidence for niche

differentiation among cryptic species. *Infection, genetics and evolution*, 36, 15-22.

Grinnell, J. (1917). The niche-relationships of the California Thrasher. *The Auk*, 34(4), 427-433.

Guarneri, A. A., Lazzari, C., Xavier, A. A. P., Diotaiuti, L., & Lorenzo, M. G. (2003). The effect of temperature on the behaviour and development of *Triatoma brasiliensis*. *Physiological Entomology*, 28(3), 185-191.

Gualdrón, L. E., Brochero, H. L., Arévalo, C., Pérez, L. D. P., Suárez, M. C., & Olano, V. A. (2001). Hallazgo de algunos vectores de la enfermedad de Chagas en el departamento del Amazonas y sus implicaciones en salud pública. *Revista Colombiana de Entomología*, 27(2), 121-127.

Guhl, F. (2017). Geographical distribution of Chagas disease, pp. 89-112. In: Tellería J. and M. Tibnayrenc [eds.]. *American Trypanosomiasis Chagas Disease: one Hundred Years of Research*. Elsevier. London. DOI:[10.1016/B978-0-12-801029-7.00005-8](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801029-7.00005-8)

Hotez, P. J., Bottazzi, M. E., Franco-Paredes, C., Ault, S. K., & Periago, M. R. (2008). The neglected tropical diseases of Latin America and the Caribbean: a review of disease burden and distribution and a roadmap for control and elimination. *PLoS neglected tropical diseases*, 2(9), e300.

Ibarra-Cerdeña, C. N., Sánchez-Cordero, V., Peterson, A. T. & Ramsey, J. (2009). Ecology of North American Triatominae. *Acta Tropica*, 110: 178-186.

Kjols, A. A., Snowden, K. F. & Olson, J. K. (2009). Biogeography and *Trypanosoma cruzi* infection prevalence of Chagas disease vectors in Texas, USA. *Vector-Borne and Zoonotic Diseases*, 9: 41-49.

Klotz, S. A., Shirazi, F. M., Boesen, K., Beatty, N. L., Dorn, P. L., Smith, S., & Schmidt, J. O. (2016). Kissing bug (*Triatoma* spp.) intrusion into homes: troublesome bites and domiciliation. *Environmental Health Insights*, 10, EHI-S32834.

- Lavergne, S., Molina, J., & Debussche, M. A. X. (2006). Fingerprints of environmental change on the rare Mediterranean flora: A 115-year study. *Global Change Biology*, *12*(8), 1466-1478.
- Lent, H., & Wygodzinsky, P. (1979). Revision of the Triatominae (Hemiptera, Reduviidae), and their significance as vectors of Chagas' disease. *Bulletin of the American museum of Natural History*, *163*(3), 123-520.
- López-Cárdenas, J., Bravo, F. E. G., Schettino, P. M. S., Solorzano, J. C. G., Barba, E. R., Mendez, J. M., Sánchez-Cordero, V., Townsend-Peterson, A. & Ramsey, J. M. (2005). Fine-scale predictions of distributions of Chagas disease vectors in the state of Guanajuato, Mexico. *Journal of medical entomology*, *42*(6), 1068-1081.
- Magallón-Gastélum, E., Lozano-Kasten, F., Bosseno, M. F., Cárdenas-Contreras, R., Ouaisi, A., & Brenière, S. F. (2004). Colonization of rock pile boundary walls in fields by sylvatic triatomines (Hemiptera: Reduviidae) in Jalisco State, Mexico. *Journal of medical entomology*, *41*(3), 484-488.
- Martínez-Ibarra, J. A., Noguera-Torres, B., Montañez-Valdez, O. D., Rocha-Chávez, G., & Tapia-González, J. M. (2012). Presencia de *Meccus longipennis* y *Triatoma recurva* en el estado de Durango, México. *Boletín de Malariología y Salud Ambiental*, *52*(1), 129-133.
- Martínez, A., Carcavallo, R. U., & Pelaez, D. (1984). *Triatoma brailovskyi*, Nueva Especie de Triatominae de México. *Chagas*; 1:39-42.
- Martínez-Tovar, J. G., Rodríguez-Rojas, J. J., Arque-Chunga, W., Lozano-Rendón, J. A., Ibarra-Juárez, L. A., Dávila-Barboza, J. A., Fernández-Salas I. & Rebollar-Téllez, E. A. (2013). New geographical records and infection notes of *Triatoma gerstaeckeri* (Stål) and *Triatoma rubida* (Uhler)(Hemiptera: Reduviidae: Triatominae) in Nuevo Leon and Coahuila, Mexico. *Acta zoológica mexicana*, *29*(1), 227-233.
- Molina, J. A., Gualdrón, L. E., Brochero, H. L., Olano, V. A., Barrios, D., & Guhl, F. (2000). Distribución actual e importancia epidemiológica de las especies

- de triatomíneos (Reduviidae: Triatominae) en Colombia. *Biomédica*, 20(4), 344-60.
- Olivier M. C., Olivier L. J., Segal D. B. (1972). A Bibliography on Chagas Disease (1909-1969), Index Cat Med Vet Zool Sp. Pub. No. 2, US Government Printing Office, Washington 633 pp.
- Parmesan, C., & Yohe, G. (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421(6918), 37.
- Rey L. Parasitología. Rio de Janeiro: Edit. Guanabara Koogan; 1972. p. 695.
- Ramsey, J. M., Ordoñez, R., Tello-López, A., Pohls, J. L., Sánchez, V. & Peterson, A. T. (2003). Actualidades sobre la epidemiología de la enfermedad de Chagas en México, pp. 85-103. *In*: Ramsey, J. M., Tello-López, A. & Pohls, J. L. (Eds.). *Iniciativa para la Vigilancia y el Control de la Enfermedad de Chagas en la República Mexicana*. Instituto Nacional de Salud Pública. Cuernavaca, México.
- Ramsey, J. M., Peterson, A. T., Carmona-Castro, O., Moo-Llanes, D. A., Nakazawa, Y., Butrick, M., Tun-Ku, E. de la Cruz-Félix, K. & Ibarra-Cerdeña, C. N. (2015). Atlas of Mexican Triatominae (Reduviidae: Hemiptera) and vector transmission of Chagas disease. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, 110, 339-352.
- Reisenman, C. E., Lawrence, G., Guerenstein, P. G., Gregory, T., Dotson, E. & Hildebrand, J. G. (2010). Infection of kissing bugs with *Trypanosoma cruzi*, Tucson, Arizona, USA. *Emerging Infectious Diseases*, 16: 400-405.
- Root, T. L., MacMynowski, D. P., Mastrandrea, M. D., & Schneider, S. H. (2005). Human-modified temperatures induce species changes: joint attribution. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(21), 7465-7469.
- Rodríguez-Bataz, E., Noguera-Torres, B., Rosario-Cruz, R., Martínez-Ibarra, J. A., & Rosas-Acevedo, J. L. (2011). Triatomíneos (Hemiptera: Reduviidae)

- vectores de *Trypanosoma cruzi* Chagas 1909, en el estado de Guerrero, México. *Revista Biomédica*, 22(1), 31-40.
- Saupe, E., Barve, V., Myers, C., Soberón, J., Barve, N., Hensz, C., Peterson, A., Owens, H., & Lira-Noriega, A. (2012). Variation in niche and distribution model performance: The need for a priori assessment of key causal factors. *Ecological Modelling*, 237, 11–22.
- Schofield, C. J., Diotaiuti, L., & Dujardin, J. P. (1999). The process of domestication in Triatominae. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, 94, 375-378.
- Salazar-Schettino, P. M., de Haro Arteaga, I., & Cabrera Bravo, M. (2005). Tres especies de triatomíneos y su importancia como vectores de *Trypanosoma cruzi* en México. *Medicina (Buenos Aires)*, 65(1), 63-69.
- Salazar-Schettino, P. M., de Haro Arteaga, I., & Berrueta, T. U. (1988). Chagas disease in Mexico. *Parasitology Today*, 4(12), 348-352.
- Tay, J., Schenone Cabrera, H., Sánchez T, J., & Robert, L. (1992). Estado actual de los conocimientos sobre la enfermedad de Chagas en la República Mexicana. *Bol. chil. parasitol*, 43-53.
- Velasco-Castrejón, Ó., & Rivas-Sánchez, B. (2008). Apuntes para la historia de la enfermedad de Chagas en México. *Boletín médico del Hospital Infantil de México*, 65(1), 57-79.
- Walther, G. R., Berger, S., & Sykes, M. T. (2005). An ecological 'footprint' of climate change. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 272(1571), 1427-1432.
- Wiens, J. J., Ackerly, D. D., Allen, A. P., Anacker, B. L., Buckley, L. B., Cornell, H. V. & Hawkins, B. A. (2010). Niche conservatism as an emerging principle in ecology and conservation biology. *Ecology letters*, 13(10), 1310-1324.
- Zárate, L. G. & Zárate, R. J. 1985. A checklist of the Triatominae (Hemiptera: Reduviidae) of Mexico. *International Journal of Entomology*, 27: 102-127.

Zeledón, R., Guardia, V. M., Zuñiga, A., & Swartzwelder, J. C. (1970). Biology and ethology of *Triatoma dimidiata* (Latreille, 1811) II. Life span of adults and fecundity and fertility of females. *Journal of medical entomology*, 7(4), 462-469.

**CAPÍTULO 2. Current and Future Spatial Modeling of Habitat Suitability of
*Triatoma nitida*¹ Usinger in Latin America
Modelado Espacial Actual y Futuro de la Idoneidad de Hábitat de *Triatoma nitida*
Usinger en Latinoamérica**

María Guadalupe Torres-Delgado², Francisco Gerardo Véliz-Deras², Francisco Javier Sánchez-Ramos², Enrique Ruíz-Cancino⁵, Aldo Rafael Martínez-Sifuentes⁶, Urbano Nava-Camberos⁷, Verónica Ávila-Rodríguez⁴ y Aldo Iván Ortega-Morales^{2, 3*}

Resumen. *Triatoma nitida* Usinger es vector del parásito *Trypanosoma cruzi* (Chagas) causante de la enfermedad de Chagas, con alta capacidad de adaptación a zonas con diferencias geográficas y climáticas, lo que podría llegar a afectar a la población humana. Considerando la problemática actual de las enfermedades reemergentes el presente estudio se realizó con los objetivos de delimitar la distribución actual de *T. nitida* en Latinoamérica, identificar las variables ambientales de mayor influencia sobre la distribución de la especie para el clima futuro (2041-2060 y 2081-2100) bajo los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5 (GtCO₂) e identificar las nuevas zonas con alta idoneidad de hábitat. Se generó una base de datos con 55 registros geográficos. Se descargaron 19 variables bioclimáticas del periodo actual con resolución de 2.5 arc-min.

¹Hemiptera: Reduviidae: Triatominae

²Postgrado en Ciencias en Producción Agropecuaria, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro – Unidad Laguna, Periférico Raúl López Sánchez S/N, Valle Verde, C.P. 27054, Torreón, Coahuila, México. mariatorresdelgado91mail.com

³Laboratorio de Biología Molecular, Departamento de Parasitología Agrícola, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro–Unidad Laguna, Periférico Raúl López Sánchez S/N, Valle Verde, C.P. 27054, Torreón, Coahuila, México.

⁴Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Juárez del Estado de Durango. Av. Universidad S/N. Col. Filadelfia. C.P. 35070, Gómez Palacio, Dgo., México.

⁵Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas, Centro Universitario C.P. 87149, Ciudad Victoria, Tamaulipas, México.

⁶Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, CENID-RASPA, Gómez Palacio, Dgo. México.

⁷Facultad de Agricultura y Zootecnia/Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez del Estado de Durango, Gómez Palacio, Durango, México.

*Autor de correspondencia: agortega@hotmail.com

Para la proyección del clima futuro se consideró el modelo de Beijing Climate Center-Climate System Model para los años 2041-2060 y 2081-2100 bajo los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5. La superficie estimada para Latinoamérica fue de 2, 089,284 km², abarcando 17 países y 13 estados de México con zonas potenciales para la presencia de la especie. La superficie estimada para los climas futuros fue de 205,515 km² para 2041-2060 y de 857 km² para 2081-2100, siendo la mayor distribución en los estados de Oaxaca y Chiapas en México y los países centroamericanos Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua, Venezuela y Brasil. Se puede señalar que bajo este modelo la tendencia de disminución del área de distribución de *T. nitida* representa un menor riesgo epidemiológico para la población humana. Aunque la tendencia de los resultados muestra dicha disminución, se encontraron nuevas zonas geográficas de invasión las cuales poseen características climáticas ideales para el establecimiento del vector, lo que podría contribuir a su adaptación, incrementar su capacidad vectorial, así como ampliar la distribución de la enfermedad de Chagas a nuevas zonas de Latinoamérica, por lo anterior es importante considerar las áreas con alta idoneidad de hábitat.

Abstract. *Triatoma nitida* Usinger is a vector of the parasite *Trypanosoma cruzi* (Chagas) that causes Chagas disease, with a high capacity to adaptation to areas with geographical and climatic differences, which could affect the human population. Considering the current problem of reemerging diseases, the present study was carried out with the objectives of delimiting the current distribution of *T. nitida* in Latinoamérica, identifying the environmental variables with the greatest influence on the distribution of the species for the future climate (2041-2060 and 2081-2100) under two climate change scenarios SSP1-2.6 and SSP5-8.5 (GtCO₂) and to identify new invaded areas. A database with 55 geographic records was generated. Nineteen bioclimatic variables of the current period were downloaded with a resolution of 2.5 arc-min. For the future climate projection, the Beijing Climate Center-Climate System Model was considered for the years 2041-2060 and 2081-2100 under scenarios SSP1-2.6 and SSP5-8.5. The calibration of the model was carried out by calculating the standardized coefficient of information from Akaike in R version 4.0.5 environment. The estimated area for Latin America was 2,089,284 km², 17 countries and 13 states of Mexico were identified with potential areas for the presence of the species. The estimated area for future climates presented with a decreasing trend from 205,515 km² for 2041-2060 and 857 km² for 2081-

2100, being the largest distribution in the states of Oaxaca and Chiapas in Mexico and the Central American countries Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua, Venezuela and Brazil. It can be noted that under this model the trend of decreasing the distribution area of *T. nitida* represents a lower epidemiological risk for the human population. Although the trend of the results show this decrease, new geographical areas of invasion were found which have ideal climatic characteristics for the establishment of the vector, which could contribute to its adaptation, increase its vectorial capacity, as well as expand the distribution of Chagas disease to new areas of Latin America, therefore, it is important to consider areas with high habitat suitability.

Introducción

Los triatomas (Hemiptera: Reduviidae) son los vectores principales de la enfermedad causada por el parásito *Trypanosoma cruzi* (Chagas), conocida como Tripanosomiasis Americana o enfermedad de Chagas. Se han registrado 150 especies reconocidas en todo el mundo capaces de transmitir el parásito, pero solo algunas se consideran de importancia médica por sus características adaptativas estrictas. Siendo hematófagas obligadas, para tener el alimento disponible, se han adaptado a casas habitación convirtiéndose en vectores eficientes de la enfermedad (Galvão et al. 2003, Schofield and Galvão 2009, Guhl 2017).

En México se han documentado 32 vectores de *T. cruzi*, siendo *Triatoma* el género más común con 19 especies de amplia distribución (Salazar-Schettino et al. 2007). Por su importancia epidemiológica destacan *Triatoma barberi* (Usinger), *Triatoma dimidiata* (Latreille), *Triatoma pallidipennis* (Stål), *Triatoma longipennis* (Usinger), *Triatoma infestans* (Klug), *Triatoma mazzotti* (Usinger), *Triatoma mexicana* (Herrich-Schaeffer), *Triatoma gerstaeckeri* (Stål) y *Triatoma picturata* (Usinger) (Ramsey et al. 2015). Se han registrado diversas especies selváticas que han modificado su hábitat debido a factores como nichos ecológicos disponibles o la destrucción de las zonas de anidación, obligándolas a invadir ambientes domésticos, siendo este el caso de *T. infestans* una de las especies de mayor importancia en la actualidad (Guhl 2017). *Triatoma nitida* es una especie selvática que se ha encontrado recientemente invadiendo casas habitación, considerada como una especie de bajo riesgo debido a su limitada distribución; en Guatemala se colectó junto a *T. infestans* y *Rhodnius prolixus* especies de gran importancia vectorial. Diversos autores señalan que la capacidad de adaptación de *T. nitida* es alta y su positividad a *T. cruzi* la colocan en la lista de especies de alerta epidemiológica (Monroy

et al. 2003, Martínez-Ibarra et al. 2019). Dias (1952) señaló que esta especie se encontró infectada por el parásito *T. cruzi* en Guatemala. Posteriormente León (1959) reportó un alto grado de infección de la especie en el mismo país, donde 83% de los especímenes colectados dieron positivo a *T. cruzi*. Se encontró la especie en ocho departamentos (Alta Verapaz, Chiquimula, Guatemala, Huehuetenango, Jalapa, Jutiapa, Quiché y Santa Rosa) (Monroy et al. 2003). *Triatoma nitida* también ha sido colectada en Costa Rica, Honduras y México (Lent y Wygodzinsky 1979). González-Angulo and Ryckman (1967) reportaron por primera vez a *T. nitida* en Yucatán, México. Recientemente se corroboró su presencia en la península de Yucatán, el centro del estado de Oaxaca y en un pequeño pueblo de la Selva Lacandona, Chiapas (Martínez-Ibarra et al. 2019).

Para predecir los cambios presentes y futuros sobre la distribución de las especies existen modelos climáticos con alta resolución espacial que permiten ubicar las zonas potenciales de invasión (Fick y Hijmans 2017). Se han pronosticado aumentos en las temperaturas promedio anuales de hasta 2°C para 2050 y 3.5 °C para 2100, lo que afectaría las distribuciones geográficas modificando severamente los patrones epidemiológicos (IPCC 2018).

Se conoce la distribución de *Rhodnius pallescens* (Barber), *R. neglectus* (Lent), *T. pseudomaculata* (Corrêa and Espínola) y *T. wygodzinskyi* (Lent) (Arboleda et al. 2009, Carbajal-de la Fuente et al. 2009, Gurgel-Goncalces y Cuba 2009), así como de los distintos complejos en México, Brasil y Argentina (Peterson et al. 2002, Sandoval-Ruiz et al. 2008, Cécere et al. 2004, Vasquez et al. 2005). Por lo que existe la probabilidad de que el cambio climático genere nuevas zonas aptas para el establecimiento y desarrollo de la población de *T. nitida*, debido a la presión sobre el hábitat natural por la actividad humana y la capacidad adaptativa elevada de la especie es posible que cambie sus hábitos a ser intradomiciliaria (Martínez-Ibarra et al. 2019).

La importancia de ubicar las zonas de distribución de *T. nitida* permite prevenir la futura problemática de salud pública tanto a nivel nacional como internacional. En el presente trabajo se establecieron como objetivos: i) delimitar la distribución actual de *T. nitida* en Latinoamérica, ii) identificar las variables ambientales de mayor influencia sobre la distribución de *T. nitida* para el clima futuro (2041-2060 y 2081-2100) bajo dos escenarios de cambio climático SSP1-2.6 y SSP5-8.5 e iii) identificar las nuevas zonas de distribución en Latinoamérica.

Materiales y Métodos

Se obtuvieron registros geográficos de presencia de *T. nitida* del Fondo Mundial de la Información en Biodiversidad (GBIF 2018). Los registros fueron depurados para eliminar registros duplicados o fuera del área conocida, para finalmente contar con un total de 55 registros geográficos de presencia de *T. nitida*. Los registros se visualizaron en el software Google Earth para corroborar su precisión, de acuerdo a la distribución conocida de la especie.

Las variables ambientales que describen el clima actual se obtuvieron de la base de datos WorldClim (Hijmans et al. 2005). Se descargaron 19 variables bioclimáticas: temperatura media anual (BIO1), rango de temperatura media diurna (BIO2), isotermalidad (BIO3), estacionalidad de la temperatura (BIO4), temperatura máxima del mes más cálido (BIO5), temperatura mínima del mes más frío (BIO6), rango de temperatura anual (BIO5-BIO6) (BIO7), temperatura media del trimestre más lluvioso (BIO8), temperatura media del trimestre más seco (BIO9), temperatura media del trimestre más cálido (BIO10), temperatura media del trimestre más frío (BIO11), precipitación anual (BIO12), precipitación del mes más lluvioso (BIO13), precipitación del mes más seco (BIO14), estacionalidad de la precipitación (BIO15), precipitación del trimestre más lluvioso (BIO16), precipitación del trimestre más seco (BIO17), precipitación del trimestre más cálido (BIO18) y precipitación del trimestre más frío (BIO19), para el periodo 1970-2000 a una resolución de 2.5 arc-min (Fick y Hijmans 2017). Para la proyección del clima futuro, se consideró el modelo de Beijing Climate Center- Climate System Model (BCC-CSM2-MR) (Wu et al. 2019). Se seleccionaron los escenarios (SSP) SSP1-2.6 y SSP5-8.5 (Escoto et al. 2017) para los periodos 2041-2060 (horizonte 2050) y 2081-2100 (horizonte 2090) con una resolución espacial de 2.5 arc-min (~19.87 km²).

Se estableció un polígono mínimo convexo (PMC) con el conjunto de puntos de ocurrencia de los registros de presencia de *T. nitida* y se agregó una zona de amortiguamiento (50 km). En este polígono se agregaron 10,000 puntos de fondo de forma aleatoria (Villalobos et al. 2019). Se colocó información de las 19 variables ambientales del clima actual. Con esta información se llevó a cabo un análisis de correlación bivariada para evitar la multicolinealidad entre las variables (Merow et al. 2013), y se seleccionaron aquellas asociaciones con valores de $r > 0.70$ ($p < 0.05$) (Dormann et al. 2012). Se eligió la variable que presentó mayor variación o la que

representó mayor significado biológico para la especie. Esto bajo el supuesto de que el clima establece los contornos más amplios de la distribución (Araújo y Peterson 2012). La calibración del modelo se realizó a través del coeficiente estandarizado de información de Akaike (AICc), que proporciona información sobre la calidad relativa de un modelo (Warren and Seifert 2011). El método de calibración y evaluación para el modelado se llevó a cabo utilizando la biblioteca ENMeval (Muscarella et al. 2014) en el programa R versión 4.0.5 (R-Core Team 2019) al considerar la distribución conocida de la especie y las variables climáticas definidas.

Para modelar la distribución de *T. nitida*, se utilizó el software de máxima entropía MaxEnt, versión 3.4.4, el algoritmo estima la distribución de probabilidad de máxima entropía (es decir, la más dispersa o la más cercana a la uniformidad) trabaja a partir de un conjunto de variables ambientales como las climáticas y puntos de presencia georreferenciados de la especie, dando como resultado una distribución probabilística de la presencia de la especie bajo estudio (Phillips et al. 2006). El algoritmo MaxEnt se seleccionó debido a que utiliza antecedentes de presencia y pseudo-ausencia, esto último corresponde a los puntos generados al azar para ubicar zonas donde podría estar presente la especie. Por lo tanto, la elección adecuada de las variables climáticas, basado en la biología de las especies, juega un papel importante para un modelado robusto (Fitzpatrick et al. 2013). Las variables climáticas seleccionadas fueron BIO5, BIO6, BIO12, BIO14, BIO 15, BIO16 y BIO18. Los parámetros fueron, replicado interno por validación cruzada, 1,000 iteraciones, salida de tipo logística, 100 réplicas, umbral de convergencia de 0.0001; se seleccionaron 75 % de los registros para entrenamiento del modelo y el resto (25 %) para validación (Phillips y Dudik 2008).

La información obtenida del modelo calibrado se proyectó en Latinoamérica, al considerar las variables ambientales descritas anteriormente para el clima actual y futuro, utilizando el software MaxEnt (Phillips et al. 2006). El modelo de nicho ecológico se proyectó geográficamente representado como un mapa de la idoneidad del hábitat bajo las condiciones climáticas actuales para *T. nitida* en el software Arcmap versión 10.5 (ESRI 2021). Para generar los modelos a futuro, se transfirieron los parámetros del clima actual en Maxent. Se generó una diferencia entre escenarios para estimar los cambios que se prevén entre horizontes climáticos y conocer las regiones de resiliencia.

Los modelos actuales y futuros de idoneidad de hábitat de *T. nitida*, se evaluaron a través de la prueba de área bajo la curva (AUC) de ROC estándar (Hernández et al.

2006). La idoneidad del hábitat se representó por una escala estandarizada de 0 (nula idoneidad) a uno (alta idoneidad), por lo tanto, valores entre el rango de 0.7 a 0.9 categorizan al modelo como bueno, y valores por encima de 0.9 como excelente (Peterson 2011). Debido al cuestionamiento del uso de algoritmos solo con datos de presencia, al ponderar de manera similar los errores de omisión y comisión, se evaluaron los modelos adicionalmente con el análisis de ROC parcial, a través de la plataforma Niche ToolBox (Osorio-Olvera et al. 2019). Se siguieron los criterios de 1,000 réplicas por bootstrap con error de omisión de 5% (Peterson and Nakazawa 2008).

Las contribuciones de las variables utilizadas en la generación de los modelos se evaluaron mediante la prueba de Jackknife (Shcheglovitova and Anderson 2013). La importancia de la variable bioclimática para explicar la distribución observada de *T. nitida* fue evaluada mediante el porcentaje de contribución (PC) y la importancia de la permutación (IP) según la evaluación de MaxEnt, en las condiciones climáticas actuales y futuras, utilizando la fórmula % de contribución = (PC+PI)/2 (Anadón et al. 2015).

Resultados y Discusión

Modelación Actual de Idoneidad de Hábitat de *T. nitida*. Los modelos mostraron como resultado valores del AUC de ROC estándar de entre 0.793 a 0.834 para el entrenamiento, y de 0.352 a 0.983 para validación del modelo. El mejor modelo presentó un valor de ROC parcial de 1.87 (S.D. = 0.04), con un AUC de ROC estándar de 0.813 y 0.815 para entrenamiento y validación, respectivamente. Los resultados estadísticos obtenidos en el presente estudio se consideraron con buen desempeño, ya que se obtuvieron valores entre 0.7 y 0.9 de AUC, así como de ROC parcial cercanos a 2, que se consideran como adecuados sin efecto del azar (Peterson 2011, Garza-López et al. 2016). Esto significa que los modelos realizados representan la distribución geográfica de la especie de acuerdo a los puntos de presencia y las variables consideradas como relevantes. La superficie estimada para Latinoamérica en condiciones de clima actual fue de 2, 089,284 km²; zonas geográficas que corresponden a regiones tropicales y subtropicales. Siendo el área de distribución conocida de la especie 137,035 km², las zonas potenciales aumentan 1, 952,249 km², por lo que para el clima actual la detección de las zonas potenciales en Latinoamérica deben verificarse por parte del sector salud.

Lent and Wygodzinsky (1979) señalan que hay dos factores que condicionan la distribución de los triatomas, la primera es debido a que están principalmente

restringidos a zonas tropicales y subtropicales, y porque se encuentra completamente limitado al hemisferio occidental y la región oriental, por lo que el centro de la diversidad de estos vectores es América del Sur tropical y subtropical. Se ha reportado la presencia de *T. nitida* en México, Guatemala, Honduras y Costa Rica (Díaz 1952, León 1959, Lent and Wygodzinsky 1979, Monroy et al. 2003). A los que se integraron resultado de la proyección Belice, El Salvador, Nicaragua, Panamá, Colombia, Ecuador, Venezuela, Guayaquil, Perú, Bolivia, Brasil, Cuba, Haití y República Dominicana como zonas idóneas para la presencia de *T. nitida*. Las zonas son climáticamente adecuadas a la presencia de la especie debido a que presentan una variabilidad climática similar ocasionada por los modelos de circulación global.

En México *T. nitida* se ha reportado en los estados de Yucatán, Oaxaca y Chiapas pero se desconoce el área de distribución total (González-Angulo and Ryckman 1967, Ramsey et al. 2000). Los resultados del presente estudio indican las zonas idóneas para la especie, en donde se integraron 11 estados de México, Jalisco, San Luis Potosí, Tamaulipas, Veracruz, Michoacán, Estado de México, Guerrero, Querétaro, Hidalgo, Puebla y Chiapas, incluyendo Yucatán y Oaxaca, como zonas potenciales para la presencia de *T. nitida* en México (Fig. 1).

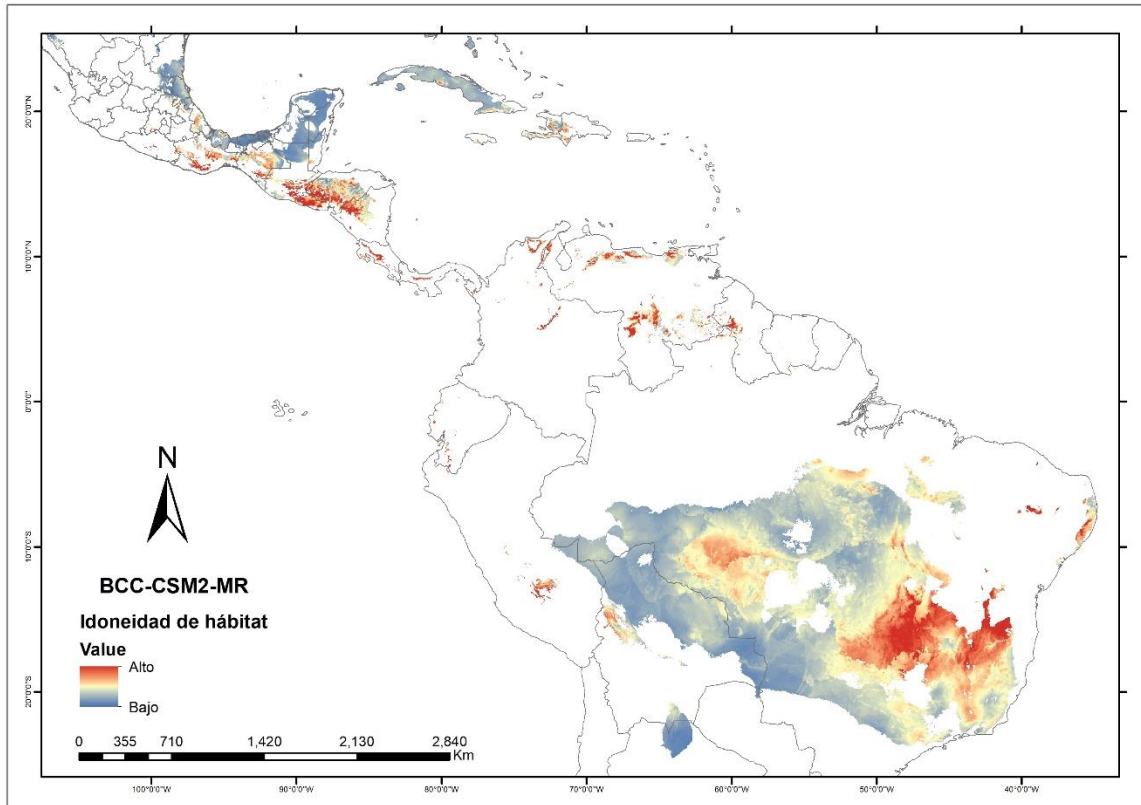


Fig. 1. Zonas potenciales de idoneidad de hábitat en Latinoamérica para *Triatoma nitida* bajo el clima actual.

Fig. 1. Potential areas of habitat suitability in Latin America for *Triatoma nitida* under the current climate.

Anadón et al. (2015) señalan que el PC e IP mediante la evaluación de MaxEnt permite determinar la variable bioclimática con mayor influencia sobre la distribución observada en las especies. Con nuestros resultados obtuvimos que la variable que más influyó sobre la distribución de *T. nitida* para los modelos de clima actual y horizontes a futuro 2041-2060 fue la BIO 5 (Temperatura máxima del mes más caliente) y para el horizonte 2081-2100 la BIO 15 (Estacionalidad de la precipitación, coeficiente de variación), las cuales influyen directamente en el comportamiento y biología de la especie, principalmente en los tiempos de alimentación y reproducción de las especies (Castillo y Wolff 2000) (Cuadro 1). Ferreira et al. (2007) mencionan que para *Rhodnius prolixus* (Stål) y *T. infestans* las variables ambientales de temperatura y precipitación influyen directamente en los procesos fisiológicos y de comportamiento. Siendo estas

dos especies con las que normalmente se ha encontrado asociada a *T. nitida*, y de acuerdo a su ecología, la distribución se rige principalmente por estas variables ambientales así como su relación para la selección de su hospedero (Ibarra-Castañeda et al. 2009, Fresquet y Lazzari 2011). Martínez-Ibarra et al. (2019), mencionan que las características geográficas donde se presentó la especie en el estado de Chiapas (precipitación de 1,804 mm y temperatura de 24.3 °C) fueron muy distintas a las que se mencionan para Oaxaca (precipitación de 600 y 800 mm y temperaturas de 18 y 22 °C), pero similares a las temperaturas de Yucatán (25 °C), confirmando el alto grado de adaptabilidad a índices geográficos completamente distintos. A pesar de que la especie es selvática e intrusiva y considerada con baja capacidad vectorial (Galvão et al. 1995), la frecuencia con la que se ha encontrado invadiendo casas habitación ha sido mayor (Ramsey et al. 2000), por lo que es necesario no subestimar la biología y comportamiento adaptativo ante nichos desocupados por el manejo de otros vectores con los que normalmente se le ha encontrado (Martínez-Ibarra et al. 2019).

Cuadro 1. Contribución Relativa de las Variables Ambientales del Clima Actual y Futuro al Modelo

Table 1. Relative Contribution of the Environmental Variables of the Current and Future Climate to the Model

Modelo	Variable						
	BIO5	BIO6	BIO12	BIO14	BIO15	BIO16	BIO18
Clima actual	49.25	32.15	2.2	0.15	9.45	0	6.8
BCC-CSM2-MR (2041-2060) (SSP1-2.6)	50.55	25.8	1	0	16.7	0	5.9
BCC-CSM2-MR (2041-2060) (SSP5-8.5)	45.2	33.75	5	0.05	10.45	0	5.55
BCC-CSM2-MR (2081-2100) (SSP1-2.6)	5.05	32.45	7.25	3.1	40.4	7.7	4.1

BCC-CSM2-MR (2081-2100) (SSP5-8.5)	5.75	33.35	8.8	2.85	36.65	10.9	1.75
---------------------------------------	------	-------	-----	------	-------	------	------

Modelado de Idoneidad de Hábitat Bajo Cambio Climático. Los mapas de idoneidad de hábitat generados para el modelo BCC-CSM2-MR mostraron mayor distribución en la zona centro de México y Sudamérica, con tendencia a la reducción de las áreas de invasión bajo los distintos escenarios (SSP1-2.6 y SSP5-8.5), proyectados a horizontes 2041-2060 y 2081-2100. Los valores de AUC de la prueba ROC estándar se encuentran en el Cuadro 2, y el valor de la prueba de ROC parcial en el Cuadro 3. De acuerdo con la proyección realizada por Medina et al. (2018), combinándola con el criterio de compartimentación de idoneidad del hábitat, los mapas que generaron muestran que los triatominos tienen todo el potencial de expandirse a prácticamente a todo México, en algunos casos compartiendo zonas por afinidad entre complejos, como el Rubida y el Lenticularia. Estos mapas indican un fuerte potencial de adaptación a nuevas regiones de México donde actualmente no se conoce su ocurrencia.

Cuadro 2. Rangos de Valores de la Prueba AUC para Entrenamiento y Validación de los Modelos

Table 2. Ranges of Values of the AUC Test for Training and Validation of the Models

Modelo	Entrenamiento	Validación
BCC-CSM2-MR (2041-2060) (SSP1-2.6)	0.795-0.847	0.221-0.986
BCC-CSM2-MR (2041-2060) (SSP5-8.5)	0.795-0.835	0.401-0.987
BCC-CSM2-MR (2081-2100) (SSP1-2.6)	0.954-0.970	0.817-0.998
BCC-CSM2-MR (2081-2100) (SSP5-8.5)	0.859-0.974	0.765-0.999

Cuadro 3. Valor de ROC Parcial para los Mejores Modelos Bajo Cambio Climático

Table 3. Partial ROC Value for the Best Models Under Climate Change

Modelo	ROC parcial	Error estándar
BCC-CSM2-MR (2041-2060) (SSP1-2.6)	1.87	0.04
BCC-CSM2-MR (2041-2060) (SSP5-8.5)	1.81	0.04
BCC-CSM2-MR (2081-2100) (SSP1-2.6)	1.82	0.06
BCC-CSM2-MR (2081-2100) (SSP5-8.5)	1.81	0.06

VARIABLES RELEVANTES EN LA IDONEIDAD DE HÁBITAT DE CLIMA ACTUAL Y FUTURO.

Las variables con mayor influencia sobre la distribución de los triatominos son la precipitación, elevación y temperatura (Ramsey et al. 2015, Carmona et al. 2018). En nuestro estudio las variables climáticas con mayor relevancia sobre la idoneidad de hábitat de *T. nitida* para cada uno de los modelos fueron: BIO 5 (Temperatura máxima de mes más caliente); BIO 6 (Temperatura mínima del mes más frío); BIO 15 (Estacionalidad de la precipitación (Coeficiente de variación); y BIO 18 (Precipitación del trimestre más cálido) (Cuadro 4). Carmona et al. (2018) señalan que la contribución de las variables no es la misma para cada especie, ya que para *T. dimidiata*, especie que comparte áreas de distribución con *T. nitida*, las variables fueron BIO 15, BIO 14, BIO 7 y BIO 4, coincidiendo solo con BIO 15.

Cuadro 4. Variables Ambientales más Importantes para *T. nitida* en Latinoamérica

Table 4. Most Important Environmental Variables for *T. nitida* in Latin America

Modelo	Variables	Contribución
Clima actual	BIO6, BIO5, BIO15, BIO18	98.30%
BCC-CSM2-MR (2041-2060) (SSP1-2.6)	BIO6, BIO5, BIO15, BIO18	99.40%
BCC-CSM2-MR (2041-2060) (SSP5-8.5)	BIO6, BIO5, BIO15, BIO18	98.70%

BCC-CSM2-MR (2081-2100) (SSP1-2.6)	BIO15, BIO6, BIO16, BIO18, BIO5	96.60%
BCC-CSM2-MR (2081-2100) (SSP5-8.5)	BIO15, BIO6, BIO16, BIO5	94.60%

Superficie Estimada de Idoneidad de Hábitat Actual y Futura en Latinoamérica. La dispersión de la tripanosomiasis se restringe a América y corresponde en gran medida a sus vectores (Guhl 2017). En este estudio la superficie estimada de idoneidad de hábitat de *T. nitida* bajo condiciones de clima actual (Cuadro 5) muestra zonas amplias en México, Belice, Guatemala, Honduras, El Salvador y Nicaragua. Sin embargo, dicha distribución podría modificarse para futuros escenarios epidemiológicos, involucrando cambios en la distribución e infestación de nuevas localidades (Abad-Franch et al. 2013). Los mapas de idoneidad de hábitat para los horizontes climáticos de 2041-2060 y 2081-2100 bajo los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5 muestran la reducción de los nichos potenciales para estos años (Fig. 2). Medone et al. (2015) realizaron proyecciones a 2050 en donde *R. prolixus* mostró expansión a nuevas áreas, mientras que *T. infestans* tendió a disminuir su área de distribución, siendo especies que se han encontrado compartiendo hábitat con *T. nitida*, por lo que de acuerdo con Rolandi y Schilman (2012), la enfermedad tendría un cambio de ubicación localizada, pero sin tendencias a expandirse por medio de *T. nitida*. A diferencia de los resultados obtenidos en el presente estudio y de los reportados por otros autores como Garza et al. (2014), quienes obtuvieron como resultado la expansión de la distribución de otras especies del mismo género en América del Norte como *T. gerstaeckeri* y *Triatoma sanguisuga* (LeConte) con una proyección a 2050 desde los estados de Veracruz, Coahuila y Tamaulipas hasta Michigan y Nueva York.

Cuadro 5. Superficie Estimada para *T. nitida* Bajo el Clima Actual y Condiciones de Cambio Climático

Table 5. Estimated Area for *T. nitida* Under the Current Climate and Climate Change Conditions

Modelo	Superficie (Km ²)
Clima actual	2,089,284.34
BCC-CSM2-MR (2041-2060) (SSP1-2.6)	205,515.46
BCC-CSM2-MR (2041-2060) (SSP5-8.5)	103,737.47
BCC-CSM2-MR (2081-2100) (SSP1-2.6)	61,496.25
BCC-CSM2-MR (2081-2100) (SSP5-8.5)	857.24

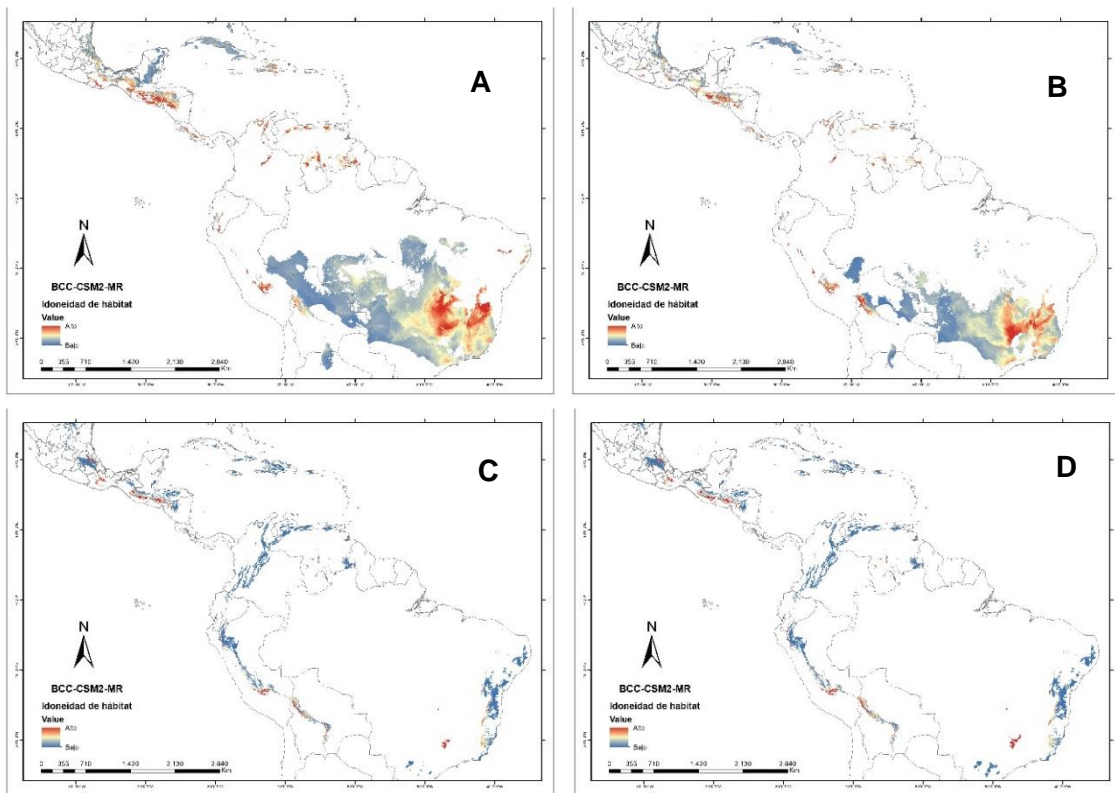


Fig. 2. Mapas de idoneidad de hábitat de *T. nitida* para BCC-CSM2-MR 2041-2060 SSP1-2.6 (A), BCC-CSM2-MR 2041-2060 SSP5-8.5 (B), BCC-CSM2-MR 2081-2100 SSP1-2.6 (C), y BCC-CSM2-MR 2081-2100 SSP5-8.5 (D).

Fig. 2. Habitat suitability maps of *T. nitida* for BCC-CSM2-MR 2041-2060 SSP1-2.6 (A), BCC-CSM2-MR 2041-2060 SSP5-8.5 (B), BCC-CSM2-MR 2081-2100 SSP 126 (C), and BCC-CSM2-MR 2081-2100 SSP5-8.5 (D).

De acuerdo con nuestros resultados los modelos del BCC-CSM2-MR muestran una predisposición hacia la reducción de la superficie de distribución de la especie *T. nitida* para Latinoamérica. Siendo el porcentaje de la superficie total a considerar como el 100% la generada por el modelo de idoneidad de hábitat con clima actual, para los horizontes 2041-2060 SSP1-2.6, 2041-2060 SSP5-8.5, 2081-2100 SSP1-2.6 y 2081-2100 SSP5-8.5 corresponde como áreas de resiliencia o permanencia de la especie el 9.84%, 4.97%, 2.94% y 0.04%. Estas zonas deben caracterizarse para identificar puntos vulnerables con sitios de anidación preferenciales para la especie ya que se ha informado que 18 géneros de palmeras son el refugio de por lo menos 39 especies de triatomas desde Estados Unidos hasta Argentina (Abad-Franch et al. 2015), lo que permite que estas especies silvestres tengan la facilidad de invadir casas al volar desde las palmas cercanas. Las especies selváticas normalmente ocupan ecotopos como coronas de palmas, nidos de pájaros y roedores, cabañas, árboles huecos y rocas apiladas o en cuevas (Rendón et al. 2015). Normalmente estas especies tienen pocas probabilidades de invadir viviendas humanas, pero en el caso de las invasoras como *T. nitida*, tienen la probabilidad de ocupar nichos que dejan las especies erradicadas de los hogares, aunado al proceso de adaptación que se da principalmente por la destrucción de hábitat (Cordovez y Guhl 2015). Esta es la situación de adaptación para *T. infestans* en Brasil (Guhl 2017).

Agradecimiento

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico brindado mediante la beca número 634684 y a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro- Unidad Laguna (UAAAN- UL) por impulsar el desarrollo de la presente investigación.

Referencias Citadas

Abad-Franch, F., M. Lima, O. Sarquis, R. Gurgel-Gonçalves, M. Sánchez-Martín, and J. Calzada. 2015. On palms, bugs, and Chagas disease in the Americas. *Acta Trop.* 151: 126-41. doi: 10.1016/j.actatropica.2015.07.005

- Anadón, J. D., E. Graciá, F. Botella, A. Giménez, S. Fahd, and U. Fritz. 2015. Individualistic response to past climate changes: niche differentiation promotes diverging Quaternary range dynamics in the subspecies of *Testudo graeca*. *Ecography* 38: 956-966. <https://doi.org/10.1111/ecog.01163>
- Andrade-Ochoa, S., K. F. Chacón-Vargas, B. E. Rivera-Chavira, y L. E. Sánchez-Torres. 2017. Enfermedades transmitidas por vectores y cambio climático. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes* 25: 118-128. ISSN: 1665-4412
- Araújo, M. B., and A. T. Peterson. 2012. Uses and misuses of bioclimatic envelope modeling. *Ecology* 93: 1527-1539. <http://dx.doi.org/10.1890/11-1930.1>
- Arboleda, S., D. E. Gorla, X. Porcasi, A. Saldaña, J. Calzada, and N. Jaramillo-O. 2009. Development of a geographical distribution model of *Rhodnius pallescens* Barber, 1932 using environmental data recorded by remote sensing. *Infect. Genet. Evol.* 9: 441-8. DOI: 10.1016/j.meegid.2008.12.006
- Carbajal-de la Fuente, A. L., X. Porcasi, F. Noireau, L. Diotaiuti, and D. Gorla. 2009. The association between geographic distribution of *Triatoma pseudomaculata* and *Triatoma wygodzinsky* (Hemiptera: Reduviidae) with environmental variables recorded by remote sensors. *Infect. Genet. Evol.* 9: 54-61. DOI: 10.1016/j.meegid.2008.09.008
- Carmona-Castro, O., D. A. Moo-Llanes, and J. M. Ramsey. 2018. Impact of climate change on vector transmission of *Trypanosoma cruzi* (Chagas, 1909) in North America. *Med. Vet. Entomol.* 32: 84-101 doi: 10.1111/mve.12269
- Castillo, D. y M. Wolff. 2000. Aspectos del comportamiento de los triatominos (Hemiptera: Reduviidae), vectores de la enfermedad de Chagas. *Biomédica.* 20: 59-64 doi: <https://doi.org/10.7705/biomedica.v20i1.1048>
- Cécere, M. C., G. M. Vazquez-Prokopec, R. E. Gürtler U., and Kitron. 2004. Spatio-temporal analysis of reinfestation by *Triatoma infestans* (Hemiptera, Reduviidae) following insecticide spraying in a rural community in northwestern Argentina. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 71: 803-810 DOI:10.4269/ajtmh.2004.71.803

- Cordovez, J. M., and F. Guhl. 2015. The impact of landscape transformation on the reinfestation rates of *Rhodnius prolixus* in the Orinoco Region, Colombia. *Acta Trop.* 151: 73-9. doi: 10.1016/j.actatropica.2015.07.030.
- Davila-Barboza, J., O. K. Villanueva-Segura, B. Lopez-Monroy, G. Ponce-Garcia, C. Bobadilla-Utrera, M. Montes-Rincon, Z. J. Molina-Garza, J. I. Arredondo-Jimenez, I. P. Rodriguez-Sanchez, P. C. Manrique-Saide, and A. E. Flores. 2019. Novel Kdr mutations (K964R and A943V) in pyrethroid-resistant populations of *Triatoma mazzottii* and *Triatoma longipennis* from Mexico and detoxifying enzymes. *Insect. Sci.* 26: 809-820. DOI: 10.1111/1744-7917.12594
- Dias, E. 1952. Doença de Chagas nas Americas. III- America Central. *Rev. Bras. Malariol. D. Trop.* 4: 75-84 ISSN: 1678-8060
- Dormann, C. F., J. Elith, S. Bacher, C. Buchmann, G. Carl, G. Carré, J. R. García-Marquéz, B. Gruber, B. Lafourcade, P. J. Leitão, T. Münkemüller, C. McClean, P. E. Osborne, B. Reineking, B. Schröder, A. K. Skidmore, D. Zurell, and S. Lautenbach. 2012. Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, 35: 001-020 DOI: 10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x
- Escoto, C. A., L. S. Peña y S. G. Delgado. 2017. Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP): nuevas maneras de comprender el cambio climático y social. *Demogr. Urb.* 32: 669-693. <https://doi.org/10.24201/edu.v32i3.1684>
- ESRI. 2021. Software ArcGIS version 10.5 <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.5/get-started/installation-guide/installing-on-your-computer.htm>
- Ferreira, R. A., C. R. Lazzari, M. G. Lorenzo, and M. H. Pereira. 2007. Do Haematophagous bugs assess skin surface temperature to detect blood vessels? *PLoS ONE* 2: e932. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0000932>
- Fitzpatrick, M. C., Gotelli, N. J. & Ellison, A. M. 2013. MaxEnt versus MaxLike: empirical comparisons with ant species distributions. *Ecosphere*, 4: 55. <<http://dx.doi.org/10.1890/ES13-00066.1>>

- Fick, S. E. and R. J. Hijmans. 2017. WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.* 37: 4302-4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Fresquet, N., and C. R. Lazzari. 2011. Response to heat in *Rhodnius prolixus*: the role of the thermal background. *J. Insect. Physiol.* 57: 1446-1449. <https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2011.07.012>
- Galvão, C., J. Jurberg, V. Cunha, and R. Pinto de Mello. 1995. Biología do *Triatoma nitida* Usinger, 1939 em laboratório (Hemiptera: Revuviidae). *Mem. I. Os. Cr.* 90: 657-663. <https://doi.org/10.1590/S0074-02761995000500024>
- Galvão, C., R. Carcavallo, D. Da Silva-Rocha, and J. Jurberg. 2003. A checklist of the current valid species of the subfamily Triatominae Jeannel, 1919 (Hemiptera, Reduviidae) and their geographical distribution, with nomenclatural and taxonomic notes. *Zootaxa.* 202: 1-36. 10.11646/zootaxa.202.1.1.
- Garza, M., T. P. Ferial Arroyo, E. A. Casillas, V. Sánchez-Cordero, C. L. Rivaldi, and S. Sarkar. 2014. Projected future distributions of vectors of *Trypanosoma cruzi* in North America under climate change scenarios. *PLoS Neglected Trop. D.* 8: e2818. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0002818>
- Garza-López, M., J. M. Ortega-Rodríguez, F. J. Zamudio- Sánchez, J. F. López-Toledo, F. A. Domínguez-Alvarez, y C. Sáenz-Romero. 2016. Calakmul como refugio de *Swietenia macrophylla* King ante el cambio climático [Calakmul as a refuge for *Swietenia macrophylla* King against climate change]. *Bot. Sci.* 94: 43-50. doi: 10.17129/botsci.500
- GBIF.org. 2018. GBIF Occurrence Download <https://doi.org/10.15468/dl.cwx2bx>
- González-Angulo, W., and R. E. Ryckman. 1967. Epizootiology of *Trypanosoma cruzi* in Southwestern North America: Part IX: An investigation to determine the incidence of *Trypanosoma cruzi* infections in Triatominae and man on the Yucatan Peninsula of Mexico. *J. Med. Ent.* 1: 44-47.
- Guhl, F. 2017. Geographical distribution of Chagas disease, pp. 89-112. In: Tellería J. and M. Tibnayrenc [eds.]. *American Trypanosomiasis Chagas Disease: one Hundred Years of Research*. Elsevier. London. DOI:[10.1016/B978-0-12-801029-7.00005-8](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801029-7.00005-8)

- Gurgel-Goncalves, R., and C. A. Cuba. 2009. Predicting the potential geographical distribution of *Rhodnius neglectus* (Hemiptera: Reduviidae) based on ecological niche modeling. *J. Med. Ent.* 46: 952-960. <https://doi.org/10.1603/033.046.0430>
- Hernández, P. A., C. H. Graham, L. L. Master, and D. L. Albert. 2006. The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods. *Ecography* 29: 773-785. doi: 10.1111/j.0906-7590.2006.04700.x
- Hijmans, R. J., S. E. Cameron, J. L. Parra, P. G. Jones, and A. Jarvis. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.* 25: 1965-1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>
- Ibarra-Cerdeña, C. N., V. Sánchez-Cordero, A. T. Peterson, and J. M. Ramsey. 2009. Ecology of North American Triatominae. *Acta Trop.* 110: 178-86 <https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2008.11.012>.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2018. Resumen para responsables de políticas, pp. 1-26. En: Masson-Delmotte V., P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor y T. Waterfield [eds.]. Calentamiento Global de 1,5 °C, Informe Especial del IPCC Sobre los Impactos del Calentamiento Global de 1,5 °C con Respecto a los Niveles Preindustriales y las Trayectorias Correspondientes que Deberían Seguir las Emisiones Mundiales de Gases de Efecto Invernadero, en el Contexto del Reforzamiento de la Respuesta Mundial a la Amenaza del Cambio Climático, el Desarrollo Sostenible y los Esfuerzos por Erradicar la Pobreza. PNUMA. Ginebra Suiza. ISBN 978-92-9169-351-1 http://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_es.pdf
- Lent, H., and P. Wygodzinsky. 1979. Revision of the Triatominae (Hemiptera: Reduviidae), and their significance as vectors of Chagas disease. *B. Am. Mus. Nat. Hist.* 163: 123-520. URI: <http://hdl.handle.net/2246/1282>
- León, J. R. 1959. Estado actual de la enfermedad de Chagas en Guatemala. Resumen Epidemiológico. *Rev. Goiana Med.* 5: 445-455

- Maciel-Mata, C. A., N. Manríquez-Morán, P. Octavio-Aguilar, y G. Sánchez-Rojas. 2015. El área de distribución de las especies: revisión del concepto. *Acta Universitaria* 25: 22-38. doi: 10.15174/au.2015.690
- Martínez-Ibarra, J. A., T. Meraz-Medina, B. Noguera-Torres, M. E. Villagrán-Herrera, and J. A. de Diego-Cabrera. 2019. Life-history data of a mexican population of *Triatoma nitida* (Hemiptera: Reduviidae). *J. Med. Ent.* 20: 1-6.
- Medina, H., C. Contreras S., G. Galindo M., y B. E. Arreola M. 2018. Desarrollo de mapas de idoneidad del hábitat de triatomíneos, vectores de la enfermedad de Chagas, en México usando SIG y métodos estadísticos, pp.201-219. In: C. Contreras S., y M. G. Galindo M. [coord.]. *Geomedicina y la Tecnología Espacial Aplicada al Caso de los Vectores en Salud Humana*. UASLP-CIACyT-LAGES. San Luis Potosí. ISBN: 978-607-535-065-3.
- Medone, P., S. Ceccarelli, P. E. Parham, A. Figuera, and J. E. Rabinovich. 2015. The impact of climate change on the geographical distribution of two vectors of Chagas disease: implications for the force of infection. *Philos. T. Roy. Soc. B.* 370: 20130560. doi: 10.1098/rstb.2013.0560
- Merow, C., M. J. Smith, and J. A. Silander, 2013. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography* 36: 1058-1069. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.07872.x>
- Monroy, C., D. M. Bustamante, A. Rodas, R. Rosales, M. Mejía, and Y. Tabaru. 2003. Geographic distribution and morphometric differentiation of *Triatoma nitida* Usinger 1939 (Hemiptera: Reduviidae: Triatominae) in Guatemala. *Mem. I. Os. Cr.* 98: 37-43. <https://doi.org/10.1590/S0074-02762003000100006>
- Muscarella, R., P. J. Galante, M. Soley-Guardia, R. A. Boria, J. M. Kass, M. Uriarte, and R. P. Anderson. 2014. ENMeval: An R package for conducting spatially independent evaluations and estimating optimal model complexity for Maxent ecological niche models. *Methods Ecol. Evol.* 5: 1198-1205. DOI: <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12261>
- Osorio-Olvera, L., B. Vijay, B. Narayani, J. Soberón, and M. Falconi. 2019. Ntbox: From getting biodiversity data to evaluating species distributions models in a friendly GUI environment. R package version 0.2.5.4. <https://github.com/luismurao/ntbox>.

- Parra-Henao, G., O. Quirós-Gómez, N. Jaramillo-O, Á. S. Cardona. 2016. Environmental determinants of the distribution of Chagas disease vector *Triatoma dimidiata* in Colombia. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 94: 767-74. <http://dx.doi.org/10.4269/ajtmh.15-0197>
- Peterson, A. T. 2011. Ecological niche conservatism: a time-structured review of evidence. *J. Biogeogr.* 38: 817-827. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02456.x>
- Peterson, A. T., and Y. Nakazawa. 2008. Environmental data sets matter in ecological niche modelling: an example with *Solenopsis invicta* and *Solenopsis richteri*. *Global Ecol. Biogeogr.* 17: 135-144. doi: 10.1111/j.1466-8238.2007.00347.x
- Peterson, A. T., V. Sanchez-Cordero, C. B. Beard, and J. M. Ramsey. 2002. Ecologic niche modeling and potential reservoirs for Chagas disease, Mexico. *Emerg. Infect. Dis.* 8: 662-667. doi: 10.3201/eid0807.010454
- Phillips, S. J., and M. Dudík. 2008. Modeling of species distributions with MAXENT: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* 31: 161-175. Doi: 10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x.
- Phillips, S. J., R. P. Anderson, and R. E. Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecol. Model.* 190: 231-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Ramsey, J. M., R. Ordoñez, A. Cruz-Celis, A. L. Alvear, V. Chavez, R. Lopez, J. R. Pintor, F. Gama, and S. Carrillo. 2000. Distribution of domestic Triatominae and stratification of Chagas disease transmission in Oaxaca, México. *Med. Vet. Entomol.* 14: 19-30. doi: 10.1046/j.1365-2915.2000.00214.x.
- Ramsey, J. M., A. T. Peterson, O. Carmona-Castro, D. A. Moo-Llanes, Y. Nakazawa, M. Butrick, E. Tun-Ku, K. de la Cruz-Félix, and C. N. Ibarra-Cerdeña. 2015. Atlas of Mexican Triatominae (Reduviidae: Hemiptera) and vector transmission of Chagas. *Mem. I. Os. Cr.* 110: 339-352. <https://dx.doi.org/10.1590/0074-02760140404>
- R-Core Team. 2019. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>

- Rendón, L. M., F. Guhl, J. M. Cordovez, and D. Erazo. 2015. New scenarios of *Trypanosoma cruzi* transmission in the Orinoco region of Colombia. Mem. I. Oswaldo Cruz 110: 283-288 doi: 10.1590/0074-02760140403
- Rolandi, C., and P. E. Schilman. 2012. Linking global warming, metabolic rate of hematophagous vectors, and the transmission of infectious diseases. Front. Physiol 3: 75. doi: 10.3389/fphys.2012.00075
- Salazar-Schettino, P. M., J. S. Rosales-Piña, G. Rojas-Wastavino, M. Cabrera-Bravo, M. Vences-Blanco, and J. López-Cárdenas. 2007. *Triatoma mexicana* (Hemiptera: Reduviidae) in Guanajuato, Mexico: house infestation and seasonal variation. Mem. I. Os. Cr. 102: 803-807. <https://dx.doi.org/10.1590/S0074-02762007005000118>
- Sandoval-Ruiz, C. A., J. L. Zumaquero-Rios, and O. R. Rojas-Soto. 2008. Predicting geographic and ecological distributions of Triatomine species in the southern Mexican State of Puebla using Ecological Niche Modeling. J. Med. Ent. [http://dx.doi.org/10.1603/0022-2585\(2008\)45\[540:PGAEDO\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1603/0022-2585(2008)45[540:PGAEDO]2.0.CO;2)
- Schofield, C. J. and C. Galvão. 2009. Classification, evolution, and species groups within the Triatominae. Acta. Trop. 110: 88-100 10.1016/j.actatropica.2009.01.010.
- Shcheglovitova, M., and R. Anderson. 2013. Estimating optimal complexity for ecological niche models: A Jackknife approach for species with small simple sices. Ecol. Model. 269: 9-17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.08.011>
- Tebaldi, C., K. Debeire, V. Eyring, E. Fischer, J. Fyfe, P. Friedlingstein, R. Knutti, J. Lowe, B. O'Neill, B. Sanderson, D. van Vuuren, K. Riahi, M. Meinshausen, Z. Nicholls, K. B. Tokarska, G. Hurtt, E. Kriegler, J. F. Lamarque, G. Meehl, R. Moss, S. E. Bauer, O. Boucher, V. Brovkin, Y. H. Byun, M. Dix, S. Gualdi, H. Guo, J. G. John, S. Kharin, Y. Kim, T. Koshiro, L. Ma, D. Olivié, S. Panickal, F. Qiao, X. Rong, N. Rosenbloom, M. Schupfner, R. Séférian, A. Sellar, T. Semmler, X. Shi, Z. Song, C. Steger, R. Stouffer, N. Swart, K. Tachiiri, Q. Tang, H. Tatebe, A. Voldoire, E. Volodin, K. Wyser, X. Xin, S. Yang, Y. Yu, and T. Ziehn. 2021. Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) of CMIP6. Earth. Syst. Dynam. 12: 253-293 <https://doi.org/10.5194/esd-12-253-2021>

- Vasquez, C. M., M. C. Cecere, D. M. Canale, R. Gurtler, and U. Kitron. 2005. Spatiotemporal patterns of reinfestation by *Triatoma guayasana* (Hemiptera: Reduviidae) in a rural community of northwestern Argentina. *J. Med. Ent.* 42: 571-581.
- Villalobos, G., A. Nava-Bolaños, and J. A. De Fuentes-Vicente. 2019. A reduction in ecological niche for *Trypanosoma cruzi*-infected triatomine bugs. *Parasite. Vector.* 12: 240. <https://doi.org/10.1186/s13071-019-3489-5>
- Warren, D. L., and S. N. Seifert. 2011. Ecological niche modeling in Maxent: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria. *Ecol. Appl.* 21: 335-342. <https://doi.org/10.1890/10-1171.1>
- Wu, T., Y. Lu, Y. Fang, X. Xin, L. Li, W. Li, W. Jie, J. Zhang, Y. Liu, L. Zhang, F. Zhang, Y. Zhang, F. Wu, J. Li, M. Chu, Z. Wang, X. Shi, X. Liu, M. Wei, A. Huang, Y. Zhang, and X. Liu. 2019. The Beijing Climate Center Climate System Model (BCC-CSM): the main progress from CMIP5 to CMIP6. *Geosci. Model Dev.* 12: 1573-1600. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1573-2019>.

CAPÍTULO 3. Efecto del cambio climático actual y futuro sobre la distribución de 18 especies de importancia médica del género *Triatoma* en América

Effect of current and future climate change on the distribution of 18 medically important species of the genus *Triatoma* in America

María Guadalupe Torres-Delgado^a, Francisco Javier Sánchez-Ramos^a, Aldo Iván Ortega-Morales^{a, b}, Verónica Ávila-Rodríguez^c, Enrique Ruíz-Cancino^d, Urbano Nava-Camberos^e, y Aldo Rafael Martínez-Sifuentes^{f*}

^a Postgrado en Ciencias en Producción Agropecuaria, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro – Unidad Laguna, Periférico Raúl López Sánchez S/N, Valle Verde, C.P. 27054, Torreón, Coahuila, México. mariatorresdelgado91mail.com

^b Laboratorio de Biología Molecular, Departamento de Parasitología Agrícola, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro–Unidad Laguna, Periférico Raúl López Sánchez S/N, Valle Verde, C.P. 27054, Torreón, Coahuila, México.

^c Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Juárez del Estado de Durango. Av. Universidad S/N. Col. Filadelfia. C.P. 35070, Gómez Palacio, Dgo., México.

^d Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas, Centro Universitario C.P. 87149, Ciudad Victoria, Tamaulipas.

^e Facultad de Agricultura y Zootecnia/Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez del Estado de Durango, Gómez Palacio, Durango, México.

^f Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, CENID-RASPA, Gómez Palacio, Dgo. México.

mariatorresdelgado91@gmail.com, fjsr1958@hotmail.com, agrortega@hotmail.com, vavilar@gmail.com, eruiz@docentes.uat.edu.mx, nava_cu@hotmail.com, im_aldo09@hotmail.com*

Resumen

El género *Triatoma* incluye especies vectores del parásito *Trypanosoma cruzi*, en los últimos años se han observado modificaciones en los rangos de distribución del nicho ecológico influidos por efectos del cambio climático. Por lo tanto, se modelaron las distribuciones de 18 especies epidemiológicamente importantes, para determinar la idoneidad de hábitat actual y futura en América. La base de datos generada

fue de 14825 puntos de presencia. Se identificaron las variables ambientales de mayor influencia sobre la distribución de las especies para el clima actual y futuro. Los modelos utilizados fueron CNRM-CM6-1 y GFDL-ESM4 para el periodo 2041-2060 bajo los escenarios SSP1-2.6, SSP5-8.5 y SSP3-7.0. El área estimada para América fue de 51, 365, 341 km² a partir de los PMC de todas las especies bajo el clima actual, para los modelos futuros se observó dispersión y disminución en la distribución de todas las especies, modificando el patrón epidemiológico actual. La dispersión de estas especies podría contribuir a su adaptación e incrementar su capacidad vectorial, así como ampliar la distribución de la enfermedad de Chagas a nuevas zonas de América, por lo anterior es importante considerar las áreas con alta idoneidad de hábitat, para reestructurar las estrategias de manejo y prevención.

Palabras clave: Mal de Chagas, Triatominae, Escenarios climáticos, Modelado de nicho

Abstract

The genus *Triatoma* includes vector species of the parasite *Trypanosoma cruzi*, in recent years changes have been observed in the distribution ranges of the ecological niche influenced by the effects of climate change. Therefore, the distributions of 18 epidemiologically important species were modeled to determine current and future habitat suitability in the Americas. The database generated was 14,825 points of presence. The environmental variables with the greatest influence on the distribution of species for the current and future climate were identified. The models used were CNRM-CM6-1 and GFDL-ESM4 for the period 2041-2060 under the SSP1-2.6, SSP5-8.5 and SSP3-7.0 scenarios. The estimated area for America was 51, 365, 341 km² from the PMC of all species under the current climate, for future models dispersion and decrease in the distribution of all species were observed, modifying the current epidemiological pattern. The dispersion of these species could contribute to their adaptation and increase their vectorial capacity, as well as expand the distribution of Chagas disease to new areas of America, therefore it is important to consider the areas with high habitat suitability, to restructure the strategies management and prevention.

Key words: Chagas disease, Triatominae, Climate scenarios, Niche modeling

Introducción

La Enfermedad de Chagas (EC) es uno de los padecimientos emergentes más importantes de América, considerada dentro de las principales enfermedades desatendidas de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (Hotez et al., 2008; Ramsey et al., 2015). La EC es causada por el parásito protozoo *Tripanosoma cruzi* (Chagas), el cual es transmitido por vectores de la subfamilia Triatominae.

Recientemente se han registrado 150 especies en todo el mundo con la capacidad de transmitir a *T. cruzi*, pero sólo algunas son consideradas de relevancia médica por su capacidad de adaptación (Guhl, 2017). Los triatóminos de mayor importancia se ubican en seis géneros *Paratriatoma*, *Panstrongylus*, *Dipetalogaster*, *Belminus*, *Eratyrus* y *Triatoma*, siendo este último el que abarca la mayor cantidad de especies vectoras (Hashimoto y Schofield, 2012, Ramsey et al., 2015). Las especies de mayor importancia médica en América Latina son *T. lecticularia* (Stål), *T. sanguisuga* (Leconte), *T. barberi* (Usinger), *T. protracta* (Uhler), *T. rubida* (Uhler), *T. brailovskyi* (Martínez-Carcavalho), *T. gerstaeckeri* (Stål), *T. longipennis* (Usinger), *T. mazzottii* (Usinger), *T. mexicana* (Herrich-Schaeffer), *T. pallidipennis* (Stål), *T. phyllosoma* (Burmeister), *T. picturata* (Usinger), *T. recurva* (Stål), *T. dimidiata* (Latreille), *T. brasiliensis* (Neiva), *T. infestans* (Klug) y *T. pseudomaculata* (Corrêa-Espínola) (Cruz-Reyes y Pickering-López, 2006; Medina-Torres et al., 2010; Carmona-Castro et al., 2018). Las especies se encuentran ubicadas en ocho complejos del género *Triatoma*: brasiliensis, dimidiata, infestans, lecticularia, maculata, phyllosoma, protracta y rubida, distribuyéndose aproximadamente desde las latitudes 42°N a 46°S dentro de las zonas Neártica y Neotropical, aunque varias de ellas comparten ambas ecozonas (Lent y Wygodzinsky, 1979; Ibarra-Cerdeña et al., 2009; Guhl, 2017). En los últimos años se ha verificado que los rangos geográficos se han modificado por efectos del cambio climático (Shuman, 2010).

Además, el informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, 2020) sugiere que los cambios afectarán a América en distintos aspectos, incluyendo la salud pública, la cual influye directamente en los patrones epidemiológicos, ya que estos vectores son muy sensibles a las variaciones en el clima (Greer, 2008, Githeko et al., 2000) Aunado a esto, la capacidad de adaptarse a los hábitats modificados aumenta el riesgo de transmisión al tener mayor contacto con el ser humano (Enger et al.,

2004;Walter et al., 2007; Ibarra-Cerdeña et al., 2009; López-Cancino et al., 2015; Ramsey et al., 2015).

La presión que se ejerce sobre los ecosistemas debido a la explotación de los recursos propicia la extinción o adaptación de las especies, por lo tanto la salud humana corre mayor riesgo de verse afectada por las enfermedades transmitidas por estos vectores (Cerdeña et al., 2008). Se ha registrado en el último siglo un incremento de temperatura promedio de 0.6° C y se han pronosticado aumentos en la temperatura media anual de hasta 2°C para 2050 y 3.5°C para 2100, debido a la concentración de gases de efecto invernadero en la atmosfera (Pabón and Nicholls, 2005; IPCC, 2020). Las distribuciones geográficas de estos vectores están siendo modificadas, provocando que los patrones epidemiológicos deban ser monitoreados constantemente (Githeko et al., 2000; Gage et al., 2008; Pearman et al., 2008 Torres-Delgado et al., 2022). Esto debido a que los rangos de tolerancia de temperatura y humedad relativa son muy estrechos para la mayoría de los triatomos y pueden influir directamente en su comportamiento de anidación (Guarneri et al., 2003; Lambert et al., 2008; Lazzari et al., 2013). Mediante el uso de distintas herramientas de modelado de nicho ecológico (MNE), es posible identificar las zonas potenciales para el monitoreo de las especies. Los MNE son medidas precisas de un conjunto de variables ambientales, ecológicas y ocurrencias que determinan la proyección en el espacio ambiental y se representan geográficamente a través de mapas categóricos o continuos (Peterson, 2011). A través del conjunto de factores ambientales que permiten explicar la distribución actual donde estos vectores pueden desarrollarse, es posible transferir los parámetros para estimar las futuras áreas de invasión (Peterson, 2001; Ostfeld y Brunner, 2015). Estos modelos ayudan a entender las interacciones entre las especies de vectores y sus hospederos (Nonaka, Ebel, y Wearing, 2010). Debido al impacto sobre los nichos ecológicos y el cambio climático, es mayor la probabilidad de que los patrones de distribución de los triatomos sean modificados es mayor, poniendo en riesgo la transmisión de *T. cruzi* en América. Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue analizar las variables para las 18 especies más importantes desde el punto de vista epidemiológico del género *Triatoma*, para determinar la idoneidad de hábitat actual y por efectos de cambio climático en Latinoamérica.

Materiales y métodos

Los datos geográficos de presencia fueron obtenidos del Fondo Mundial de la Información en Biodiversidad (GBIF.org 2018). Los registros se visualizaron en el software Google Earth para corroborar la precisión de los puntos de acuerdo con la distribución conocida de cada especie. Los datos de baja confiabilidad se depuraron de la base de datos, quedando un total de 14825 puntos de presencia de las dieciocho especies del género *Triatoma* con mayor importancia médica en Latinoamérica. La información climática actual para Latinoamérica se obtuvo de la base de datos WorldClim 2.1 (Hijmans et al. 2005), la cual contiene 19 variables bioclimáticas derivadas de promedios mensuales de temperatura y precipitación, para el periodo 1970-2000 a una resolución espacial de 2.5 arc-min ($\sim 19.87 \text{ km}^2$) (Fick y Hijmans 2017). Se estableció un polígono mínimo convexo (PMC) con el conjunto de puntos de ocurrencia de los registros de presencia de cada especie y se agregó una zona de amortiguamiento (50 km). Dentro del PMC se agregaron 10,000 puntos geográficos aleatorios de fondo, para obtener los valores de las variables bioclimáticas (Villalobos et al. 2019). Para evitar la multicolinealidad se realizó un análisis de correlación bivariada para las 19 variables ambientales del clima actual (Merow et al. 2013), las variables seleccionadas fueron aquellas que mostraron asociaciones con valores de $r < 0.70$ ($p < 0.05$) (Dormann et al. 2012). Esto bajo el supuesto de que el clima establece los contornos más amplios de la distribución de las especies (Araújo y Peterson 2012). Las variables seleccionadas fueron: temperatura máxima del mes más cálido (BIO5), temperatura mínima del mes más frío (BIO6), precipitación anual (BIO12), precipitación del mes más seco (BIO14), estacionalidad de la precipitación (BIO15), precipitación del trimestre más lluvioso (BIO16) y precipitación del trimestre más cálido (BIO18). La calibración del modelo se realizó a través del coeficiente estandarizado de información de Akaike (AICc), que proporciona información sobre la calidad relativa de un modelo (Warren and Seifert 2011). El método de calibración y evaluación para el modelado se llevó a cabo utilizando la librería ENMeval (Muscarella et al. 2014) en el programa R versión 4.0.5 (R-Core Team 2019). Los modelos climáticos para clima futuro fueron Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CNRM-CM6-1) (Voldoire et al. 2019) y Geophysical Fluid Dynamics Laboratory-Earth System Model version 4.1 (GFDL-ESM4) (Dunne et

al. 2020), considerando los escenarios (SSP) SSP1-2.6, SSP5-8.5 y SSP3-7.0 (Escoto et al. 2017), del periodo 2041-2060 con una resolución espacial de 2.5 arc-min (~19.87 km²).

Para modelar la distribución de las dieciocho especies del género *Triatoma*, se utilizó el software de máxima entropía MaxEnt versión 3.4.4, el cual es un algoritmo que estima la distribución de probabilidad de máxima entropía, utilizando antecedentes de presencia y pseudo-ausencia (puntos generados al azar para ubicar zonas probables de presencia). El principio de este software se fundamenta en el uso de variables ambientales y puntos de presencia georreferenciados de la especie, dando como resultado una distribución probable de la presencia y de zonas potenciales de nicho ecológico (Phillips et al. 2017). Por lo tanto, la elección adecuada de las variables climáticas, basado en la biología de las especies, juega un papel importante para un modelado robusto (Fitzpatrick et al. 2013). Los parámetros aplicados a MaxEnt fueron, replicado interno por validación cruzada, 1,000 interacciones, salida de tipo logística, 100 réplicas, umbral de convergencia de 0.0001; se seleccionaron 75 % de los registros para entrenamiento del modelo y el resto (25 %) para validación (Phillips y Dudik 2008).

Con el software MaxEnt se proyectó la información obtenida de los modelos calibrados en Latinoamérica para el clima actual y se transfirieron los parámetros para clima futuro de los modelos CNRM-CM6-1 y GFDL-ESM4 de cada especie (Phillips et al. 2017). Se seleccionó el mejor modelo mediante la prueba de área bajo la curva (AUC) de ROC estándar (rango de 0.7 a 0.9 categorizan un buen modelo y por encima de 0.9 como excelente), generando una escala de idoneidad del hábitat estandarizada de 0 (baja idoneidad) a 1 (alta idoneidad) (Hernández et al. 2006, Peterson 2011). Posteriormente fueron evaluados mediante el análisis de ROC parcial a través de la plataforma Niche ToolBox, siguiendo los criterios de 1,000 réplicas por bootstrap con error de omisión de 5% (Peterson and Nakazawa 2008, Osorio-Olvera *et al.* 2020).

Las diferencias entre escenarios fueron comparadas para estimar los cambios que se prevén entre horizontes climáticos y conocer las zonas de invasión. La importancia en contribución de variables se desarrolló a través de la prueba de Jackknife (Shcheglovitova and Anderson 2013). Para cada especie se evaluó la importancia de las variables bioclimáticas en la distribución observada mediante el porcentaje de

contribución (PC) y la importancia de la permutación (IP) según MaxEnt [% contribución = (PC+PI) /2] (Anadón et al. 2015).

Resultados

Las especies modeladas se ubican en ocho complejos taxonómicos, siendo *Phyllosoma* el que incluye la mayor cantidad de especies. Se obtuvo un total de 14825 registros, de los cuales 7 especies se encuentran distribuidas en la región Neártica, 9 en la zona Neotropical y 4 comparten ambas áreas de distribución (Tabla 1). Las especies que presentaron mayor cantidad de registros geográficos dentro de las diferentes ecozonas fueron *T. gerstaeckeri* (Neártica) con 614, *T. infestans*, *T. dimidiata*, *T. pseudomaculata* y *T. brasiliensis* (Neotropical) con 4190, 2891, 1374 y 1079 respectivamente, *T. longipennis* y *T. mexicana* (Neártica/Neotropical) con 839 y 967 registros (Tabla 1).

Los resultados de los mejores modelos obtenidos para las dieciocho especies de *Triatoma*, los valores de AUC de ROC estándar, fueron de 0.745 a 0.978 para entrenamiento y de 0.757 a 0.997 para la validación del modelo. El análisis de ROC parcial para cada uno de los modelos fue de 1.55 (S.D. = 0.01) siendo el más bajo para *T. dimidiata* con un AUC de ROC estándar de 0.815 y 0.845 de entrenamiento y validación respectivamente, así como el valor más alto 1.99 para *T. picturata* (S.D = 0) con AUC de ROC estándar de 0.838 y 0.936 de entrenamiento y validación respectivamente para el clima actual (Tabla 2). Los modelos proyectados al clima futuro mostraron valores de AUC de ROC estándar entre 0.861 a 0.996 de entrenamiento y 0.740 a 0.999 para validación del modelo. Los valores de ROC parcial presentaron valores de 1.32 (S.D.= 0.01) siendo el valor más bajo para *T. barberi* y el más alto de 2 (S.D.= 0) para *T. picturata* (Tabla 3).

Las variables que se presentaron con mayor frecuencia para las condiciones del clima actual y futuro fueron BIO 6 (Temperatura mínima del mes más frío) y BIO 18 (Precipitación del trimestre más cálido), las cuales influyen directamente en la biología y comportamiento de las especies. Para el clima actual, las variables que presentaron las contribuciones relativas más altas fueron BIO 12 (Precipitación anual) y BIO5 (temperatura máxima del mes más cálido) mientras que para los modelos de cambio climático CNRM-CM6-1 bajo los escenarios SSP1-2.6, SSP5-8.5 y GFDL-ESM4 bajo

los escenarios SSP1-2.6, y SSP3-7.0, las variables BIO 15 (estacionalidad de la precipitación) y BIO 14 (precipitación del mes más seco), fueron las más representativas. Sin embargo con respecto al porcentaje de contribución de cada variable seleccionada los resultados fueron distintos para cada especie (Tabla 4).

T. barberi presentó la menor área de distribución, abarcando 81,086 km² aproximadamente en el PMC, para América se estimó un aumento de 39,554 km² más a partir del PMC hacia el sur de México, Honduras, Ecuador, Perú, Bolivia, Brasil, Paraguay, Argentina, Honduras y Ecuador. Por otro lado, *T. recurva* fue favorecida bajo condiciones del clima actual con 112,765 km², aumentando 13,436,355 km² (Tabla 5, Tabla 6) con distribución hacia zonas de México, Belice, Nicaragua, Guatemala, El Salvador, Costa Rica, Panamá, Colombia, Venezuela, Surinam, Aruba, Curazao, Trinidad, Tobago, Guyana, Guyana Francesa, Surinam, Brasil, Ecuador, Perú, Bolivia, Paraguay y Argentina (Tabla 6, Figura 1). Las proyecciones del clima futuro para los años 2041-2060 muestran que las condiciones climáticas afectan a todas las especies, dichos cambios se presentan en reducción y dispersión de *T. dimidiata* y *T. pseudomaculata*. El modelo CNRM-CM6-1 bajo el escenario SSP1-2.6 estimó un área de invasión total de 3, 222,409 km², con aumento a 3, 980,095 km² para SSP5-8.5. El modelo GFDL-ESM4 mostró un aumento para el escenario SSP1-2.6 con 4, 490,729 km², y su superficie a 4, 145,484 km² para el escenario SSP3-7.0 (Tabla 5). Ambos modelos (CNRM-CM6-1 y GFDL-ESM4) bajo los escenarios climáticos favorecen a *T. pseudomaculata* y *T. infestans*, siendo ésta última la especie de mayor distribución en México, Bolivia, Argentina y Brasil. Todas las especies se ven afectadas a causa de los efectos del cambio climático, siendo las más afectadas *T. pallidipennis*, *T. phyllosoma*, *T. picturata* y *T. lecticularia* las que redujeron hasta un 95% su área de distribución potencial aislándose en zonas de México, Honduras, Nicaragua, Brasil, Bolivia, Argentina, Venezuela, Perú, Chile (Tabla 6, Figura 2, 3, 4 y 5).

Discusión

A pesar de que el género *Triatoma* se encuentra ampliamente distribuido en toda América, las principales especies de importancia médica se encuentran restringidas a determinadas zonas geográficas, concentrándose la mayor cantidad en las regiones Neártica y Neotropical de México (Carmona-Castro et al. 2018). Rojo-Medina et al

(2018), señalan que en México se tienen registrados ocho géneros y 31 especies de *Triatoma*, debido a que en dos terceras partes del territorio mexicano se encuentran las condiciones ambientales necesarias para que se lleve a cabo el desarrollo de estos insectos, lo que permite que se realice con éxito la transmisión vectorial. Para América en la eco región Neártica se registraron las especies *T. brailovskyi*, *T. gerstaeckeri*, *T. lecticularia*, *T. protracta*, *T. rubida*, *T. recurva* y *T. sanguisuga*, siendo esta última exclusiva de los Estados Unidos y *T. brailovskyi* que sólo se registra para México. Se tienen identificadas 13 especies de triatomos distribuidos en la región Neártica pertenecientes a los complejos *protracta*, *lecticularia* y *rubida*, para la región Neotropical se registraron 19 especies de los complejos Dimidiata, Protracta y Filosomas (Ramsey et al., 2015 y Carmona-Castro et al., 2018). De acuerdo con los registros del presente trabajo las especies que se ubican en la eco región Neotropical son: *T. barberi*, *T. brasiliensis*, *T. dimidiata*, *T. infestans*, *T. longipennis*, *T. mazzottii*, *T. mexicana*, *T. pallidipennis*, *T. phyllosoma*, *T. picturata* y *T. pseudomaculata*, y sólo *T. barberi*, *T. longipennis* y *T. mexicana* comparten ambas regiones en México. Por lo tanto, el riesgo epidemiológico sigue siendo mucho mayor en México debido a la diversidad de especies presentes (Valdez-Tah et al., 2015).

Lent y Wygodzinsky (1979), mencionaron que los principales factores que determinan la distribución de los triatomos son la dependencia a la humedad y temperatura, por lo que se restringen a zonas de América del Sur tropical y subtropical donde la diversidad es alta. Lo anterior fue corroborado por las variables con mayor importancia para todas las especies BIO 5, BIO 6, (Temperatura), BIO 12 y BIO 18 (Precipitación). Diversos estudios han demostrado compatibilidad en relación con las mismas variables de temperatura y precipitación, para el modelaje de diversas especies de triatomos desempeñando un papel importante en la distribución de las mismas (Garza et al, 2014, Carmona-Castro et al. 2018). La contribución de las variables para los modelos de cambio climático CNRM-CM6-1 y GFDL-ESM4, así como los escenarios SSP1-2.6, SSP5-8.5 y SSP1-2.6, y SSP3-7.0, no fueron los mismos para cada especie. Las variables con mayor recurrencia fueron BIO 6 (Temperatura), BIO 18, BIO 15 y BIO 14 (Precipitación). En el trabajo realizado por Carmona-Castro et al. (2018), se obtuvo el mismo factor referente a la contribución de las variables para cada especie, por

lo que señalan que otras variables como la región, topografía y elevación influyen directamente en las proyecciones.

La distribución de las especies de acuerdo con los modelos del clima actual, sugieren un incremento considerable en las zonas con características ecológicas y biogeográficas similares, siendo desfavorable para la población humana aumentando el riesgo de infección por *T. cruzi*. Se ha mencionado la relación entre los patrones de distribución de los triatominos y la historia del flujo migratorio y comercial, la deforestación, los cambios naturales que influyen directamente en los procesos de adaptación de las especies (Soberón, 2007, Campbell et al., 2015). Medina et al. (2018), mencionan que los triatominos tienen todo el potencial de ampliar su distribución, e incluso de coexistir con otras especies del mismo género. De acuerdo con las proyecciones realizadas, las especies que se ubican sólo en México muestran patrones de distribución muy diferentes para cada una de ellas. *Triatoma picturata*, que actualmente se encuentra aislada principalmente en México en los estados de Nayarit y Jalisco, se puede observar que se distribuye también en Ecuador, Bolivia, Brasil, Venezuela, Paraguay, Colombia, Argentina, Cuba y República Dominicana, ampliando hasta 1, 604, 108 km² en toda América. Esta especie comparte actualmente el área de distribución con *T. longipennis*, abarcando otros estados como Sinaloa en México y expandiéndose a Brasil, Argentina y Bolivia.

El área de distribución para *T. phyllosoma* y *T. pallidipennis* se desplaza hacia el sur de México, las Antillas y países del sur de América. Para *T. mexicana* se observa que existen áreas adecuadas en México en los estados de Baja California, Baja California Sur, Sonora, Tamaulipas, Nuevo León, San Luis Potosí, Zacatecas, Coahuila, Guanajuato, Quintana Roo, Cd. de México, Veracruz, Oaxaca, Puebla y en países del sur de América. Para *Triatoma mazzottii*, las zonas adecuadas se aíslan en los estados del sur de México (Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca, Chiapas) y en Belice, Guatemala, El Salvador, Nicaragua, Panamá, Costa Rica, Colombia, Venezuela, Ecuador, Perú, Guyana Francesa, Brasil. *Triatoma barberi* permanece en la zona actual de distribución, pero existe la probabilidad de que se extienda hacia las Sierras Madre Oriental y Occidental en México, así como a Honduras, Ecuador, Perú, Bolivia, Brasil, Paraguay, Argentina y Ecuador. De acuerdo con el clima futuro, se predice que *T.*

barberi sólo se ve favorecida en el modelo CNRM-CM6-1 bajo el escenario SSP5-8.5, donde se aprecian zonas con mejores condiciones para la especie, disminuyendo considerablemente para los otros escenarios a futuro. Debido probablemente a la modificación de las zonas de anidación, mediante el cambio de materiales de construcción de las viviendas, se forza a la especie a desplazarse a zonas menos perturbadas (Moreno-Sanchez et al., 2012, Valdez-Tah et al., 2015).

Triatoma brailovskyi es una de las especies con menor número de registros, con una distribución en la región norte de México, bajo el clima actual, se muestra que existen zonas idóneas donde puede adaptarse en los estados de Baja California Sur, Veracruz, Tabasco, Chiapas, Campeche y Oaxaca, siguiendo hasta Belice, Guatemala, Honduras, El Salvador, Costa Rica, Panamá, Colombia, Venezuela, Guyana, Guyana Francesa, Trinidad y Tobago, Ecuador, Perú/Jamaica, Haití, República Dominicana y las Islas Británicas. En los escenarios de clima futuro, el área potencial disminuye considerablemente, lo que difiere de lo que mencionan Carmona-Castro et al. (2018), sugiriendo que las poblaciones de esta especie se ven favorecidas bajo condiciones de RCP extremos. En el caso de *T. sanguisuga* siendo la única especie aislada hasta el momento en los E.U.A., se proyecta que existen zonas adecuadas en los estados mexicanos de Nuevo León, San Luis Potosí, Veracruz y Yucatán, así como Brasil, Paraguay, Chile, Argentina, Uruguay. Respecto a las especies transfronterizas con Estados Unidos, *T. protracta*, *T. recurva*, *T. rubida* comparten las zonas de distribución hacia el noreste de México, *T. lecticularia*, y *T. gerstaeckeri*, las cuales se ubican hacia la zona noroeste de México, donde la especie mejor favorecida es *T. recurva*, la cual abarca casi es su totalidad la zona del sur de América. *T. dimidiata* es la única especie que de acuerdo a los registros geográficos abarca la distribución más amplia, por lo que la proyección muestra que es una de las especies que se mantiene dentro de las más favorecida bajo el clima actual y futuro. En el caso de las especies más importantes de Suramérica *T. infestans* reduce su área potencial para todos los escenarios, *T. pseudomaculata* mantiene su nicho ecológico y es una de las especies que expande su distribución para las proyecciones a futuro, y para *T. brasiliensis* las condiciones afectan su distribución en cuanto a superficie, pero existen zonas potenciales de invasión muy

similares en México en los estados de Baja California Sur, Sonora, Nayarit, Jalisco, Colima, Michoacán Guerrero, Oaxaca, Tabasco, Veracruz, Yucatán.

El movimiento de las especies de triatomas epidemiológicamente importantes se da principalmente por la dispersión asistida y su capacidad de adaptación considerablemente alta, aunque es conocida la distribución para algunas especies, la importancia de la identificación en los patrones de migración humana es elemental para establecer alertas de salud pública (Dorn et al., 2009). A pesar del amplio conocimiento que se tiene del género *Triatoma* a nivel mundial, los aspectos ecológicos, taxonómicos y de distribución siguen siendo poco estudiados, la importancia de conocer las zonas de invasión, permite mejorar y focalizar las estrategias de manejo y control ya establecidas en algunos países como México y desarrollarlas en donde no hay, ya que el movimiento de las poblaciones de triatomas no conoce de límites geopolíticos y el cambio climático es inevitable.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico brindado mediante la beca número 634684 y a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro- Unidad Laguna (UAAAN- UL) por impulsar el desarrollo de la presente investigación.

Referencias

Anadón, J. D., Graciá, E., Botella, F., Giménez, A., Fahd, S., and Fritz, U. (2015).

Individualistic response to past climate changes: niche differentiation promotes diverging Quaternary range dynamics in the subspecies of *Testudo graeca*. *Ecography*, 38(9), 956-966. <https://doi.org/10.1111/ecog.01163>

Araújo, M. B., and Peterson, A. T. (2012). Uses and misuses of bioclimatic envelope modeling. *Ecology*, 93(7), 1527-1539. <http://dx.doi.org/10.1890/11-1930.1>

Campbell, L. P., Luther, C., Moo-Llanes, D. A., Ramsey, J. M., Danis-Lozano, R. and Peterson, A. T. (2015) Climate change influences on global distributions of dengue and chikungunya virus vectors. *Philosophical Transactions Royal Society B*, 370, 1–9. <https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0135>

- Carmona-Castro, O., Moo-Llanes, D. A., and Ramsey, J. M. (2018). Impact of climate change on vector transmission of *Trypanosoma cruzi* (Chagas, 1909) in North America. *Medical and veterinary entomology*, 32(1), 84-101. doi: 10.1111/mve.12269
- Cerda L, Jaime, Valdivia C, Gonzalo, Valenzuela B, M. Teresa, and Venegas L, Jairo. (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>
- Cruz-Reyes, A., and Pickering-López, J. M. (2006). Chagas disease in Mexico: an analysis of geographical distribution during the past 76 years-A review. *Memorias do Instituto Oswaldo Cruz*, 101(4), 345-354. doi:10.1590/S0074-02762006000400001
- Dorn, P. L., Calderón, C., Melgar, S., Moguel, B., Solorzano, E. Dumonteil, E., Rodas, A., de la Rúa, N., Garnica, R. and Monroy C. (2009) Two distinct *Triatoma dimidiata* (Latreille, 1811) taxa are found in sympatry in Guatemala and Mexico. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 3, e393. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0000393>
- Dormann, C. F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., García-Marquéz, J. R., Gruber, B., Lafourcade, B., Leitão, P. J., Münkemüller, T., McClean, C., Osborne, P. E., Reineking, B., Schröder, B., Skidmore, A. K., Zurell, D., and Lautenbach, S. (2013). Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, 36(1), 27-46. DOI: 10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x
- Dunne, J. P., Horowitz, L. W., Adcroft, A. J., Ginoux, P., Held, I. M., John, J. G., J. P. Krasting, S. Malyshev, V. Naik, F. Paulot, E. Shevliakova, C. A. Stock, N. Zadeh, V. Balaji, C. Blanton, K. A. Dunne, C. Dupuis, J. Durachta, R. Dussin, P. P. G. Gauthier, S. M. Griffies, H. Guo, R. W. Hallberg, M. Harrison, J. He, W. Hurlin, C. McHugh, R. Menzel, P. C. D. Milly, S. Nikonov, D. J. Paynter, J. Ploshay, A. Radhakrishnan, K. Rand, B. G. Reichl, T. Robinson, D. M.

- Schwarzkopf, L. T. Sentman, S. Underwood, H. Vahlenkamp, M. Winton, A. T. Wittenberg, B. Wyman, Y. Zeng and M. Zhao (2020). The GFDL Earth System Model Version 4.1 (GFDL-ESM 4.1): Overall coupled model description and simulation characteristics. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12, e2019MS002015. <https://doi.org/10.1029/2019MS002015>
- Enger, K. S., Ordoñez, R., Wilson, M. L. and Ramsey, J. M. (2004) Evaluation of risk factors for rural infestation by *Triatoma pallidipennis* (Hemiptera: Triatominae), a Mexican vector of Chagas disease. *Journal of Medical Entomology*, 41, 760–767. <https://doi.org/10.1603/0022-2585-41.4.760>
- Escoto, C. A., Peña L. S. y Delgado S. G. (2017). Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP): nuevas maneras de comprender el cambio climático y social. *Demogr. Urb.* 32: 669-693. <https://doi.org/10.24201/edu.v32i3.1684>
- Fitzpatrick, M. C., Gotelli, N. J. and Ellison, A. M. (2013). MaxEnt versus MaxLike: empirical comparisons with ant species distributions. *Ecosphere*, 4: 55. <<http://dx.doi.org/10.1890/ES13-00066.1>>
- Fick, S. E., and Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International journal of climatology*, 37(12), 4302-4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Garza, M., Feria Arroyo, T. P., Casillas, E. A., Sanchez-Cordero, V., Rivaldi, C. L., and Sarkar, S. (2014). Projected future distributions of vectors of *Trypanosoma cruzi* in North America under climate change scenarios. *PLoS neglected tropical diseases*, 8(5), e2818. doi:10.1371/journal.pntd.0002818
- GBIF.org. (2018). GBIF Occurrence Download <https://doi.org/10.15468/dl.cwx2bx>
- Guhl, F. (2017). Geographical distribution of Chagas disease. In *American trypanosomiasis chagas disease* (pp. 89-112). Elsevier. DOI:[10.1016/B978-0-12-801029-7.00005-8](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801029-7.00005-8)
- Gage, K. L., Burkot, T. R., Eisen, R.J. and Hayes, E. B. (2008) Climate and vector-borne diseases. *American Journal of Preventive Medicine*, **35**, 436–450.

- Githeko, A. K., Lindsay, S. W., Confalonieri, U. E. and Patz, J. A. (2000). Climate change and vector-borne diseases: a regional analysis. *Bulletin World Health Organization*, **78**, 1136–1147.
- Guarneri, A. A., Lazzari, C., Xavier, A. A. P., Diotaiuti, L., and Lorenzo, M. G. (2003). The effect of temperature on the behaviour and development of *Triatoma brasiliensis*. *Physiological Entomology*, *28*(3), 185-191.
<https://doi.org/10.1046/j.1365-3032.2003.00330.x>
- Greer, A., Ng, V., and Fisman, D. (2008). Climate change and infectious diseases in North America: the road ahead. *Canadian Medical Association Journal*, *178*(6), 715-722. DOI: <https://doi.org/10.1503/cmaj.081325>
- Githeko, A. K., Lindsay, S. W., Confalonieri, U. E., and Patz, J. A. (2000). Climate change and vector-borne diseases: a regional analysis. *Bulletin of the world health organization*, *78*, 1136-1147.
- Hashimoto, K. and Schofield, C. (2012) Elimination of *Rhodnius prolixus* in Central America. *Parasites & Vectors*, *5*(1), 45. <https://doi.org/10.1186/1756-3305-5-45>
- Hotez, P. J., Dumonteil, E., Woc-Colburn, L., Serpa, J. A., Bezek, S., Edwards, M. S., Hallmark C. J, Musselwhite L. W., Flink B. J., and Bottazzi, M. E. (2012). Chagas disease: “the new HIV/AIDS of the Americas”. *PLoS neglected tropical diseases*, *6*(5), e1498. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0001498>
- Hernández, P. A., Graham, C. H., Master, L. L., and Albert D. L. (2006). The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods. *Ecography* *29*: 773-785. doi: 10.1111/j.0906-7590.2006.04700.x
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, *25*(15), 1965-1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>

- Ibarra-Cerdeña, C. N., Sánchez-Cordero, V., Peterson, A. T., and Ramsey, J. M. (2009). Ecology of North American Triatominae. *Acta tropica*, 110(2-3), 178-186. <https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2008.11.012>.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2020). Resumen para responsables de políticas, pp. 1-26. En: Masson-Delmotte V., P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor y T. Waterfield [eds.]. Calentamiento Global de 1,5 °C, Informe Especial del IPCC Sobre los Impactos del Calentamiento Global de 1,5 °C con Respecto a los Niveles Preindustriales y las Trayectorias Correspondientes que Deberían Seguir las Emisiones Mundiales de Gases de Efecto Invernadero, en el Contexto del Reforzamiento de la Respuesta Mundial a la Amenaza del Cambio Climático, el Desarrollo Sostenible y los Esfuerzos por Erradicar la Pobreza. PNUMA. Ginebra Suiza. ISBN 978-92-9169-351-1 http://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_es.pdf
- Lent, H., and Wygodzinsky, P. (1979). Revision of the Triatominae (Hemiptera, Reduviidae), and their significance as vectors of Chagas' disease. *Bulletin of the American museum of Natural History*, 163(3), 123-520. URI: <http://hdl.handle.net/2246/1282>
- López-Cancino, S. A., Tun-Ku, E., de la Cruz-Felix, H. K., [Ibarra-Cerdeña](#), C. N. [Izeta-Alberdia](#) A., [Pech-Maya](#) A., [Mazariegos-Hidalgo](#) C. J., [Alba Valdez-Tah](#) A. [Ramsey](#) J. M. (2015) Landscape ecology of *Trypanosoma cruzi* in the southern Yucatan Peninsula. *Acta Tropica*, 151, 58–72. <https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2015.07.021>
- Lambert, R. C., Kolivras, K. N., Resler, L. M., Brewster, C. C. and Paulson, S. L. (2008) The potential for emergence of Chagas disease in the United States. *Geospatial Health*, 2, 227–239. <https://doi.org/10.4081/gh.2008.246>

- Lazzari, C. R., Pereira, M. H. and Lorenzo, M. G. (2013) Behavioural biology of Chagas disease vectors. *Memorias do Instituto Oswaldo Cruz*, 108, 34–47. <https://doi.org/10.1590/0074-0276130409>
- Medina, H., Contreras, C. S., Galindo, G. M., y. Arreola, M. B. E. (2018). Desarrollo de mapas de idoneidad del hábitat de triatominos, vectores de la enfermedad de Chagas, en México usando SIG y métodos estadísticos, pp.201-219. In: C. Contreras S., y M. G. Galindo M. [coord.]. *Geomedicina y la Tecnología Espacial Aplicada al Caso de los Vectores en Salud Humana*. UASLP-CIACyT-LAGES. San Luis Potosí. ISBN: 978-607-535-065-3.
- Medina-Torres, I., Vázquez-Chagoyán, J. C., Rodríguez-Vivas, R. I., and de Oca-Jiménez, R. M. (2010). Risk factors associated with triatomines and its infection with *Trypanosoma cruzi* in rural communities from the southern region of the State of Mexico, Mexico. *The American journal of tropical medicine and hygiene*, 82(1), 49. [doi:10.4269/ajtmh.2010.08-0624.300](https://doi.org/10.4269/ajtmh.2010.08-0624.300).
- Merow, C., Smith, M. J., and Silander Jr, J. A. (2013). A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, 36(10), 1058-1069. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.07872.x>
- Moreno-Sanchez, R., Torres-Rojo, J. M., Moreno-Sanchez, F., Hawkins, S., Little, J. and McPartland, S. (2012). National assessment of the fragmentation, accessibility and anthropogenic pressure on the forests in Mexico. *Journal of Forestry Research.*, 23, 529–541.
- Muscarella, R., Galante, P. J., Soley-Guardia, M., Boria, R. A., Kass, J. M., Uriarte, M., and Anderson, R. P. (2014). ENM eval: An R package for conducting spatially independent evaluations and estimating optimal model complexity for Maxent ecological niche models. *Methods in ecology and evolution*, 5(11), 1198-1205. DOI: <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12261>

- Nonaka, E., Ebel, G. D., y Wearing, H. J. (2010). Persistence of pathogens with short infectious periods in seasonal tick populations: the relative importance of three transmission routes. *PLoS One*, 5(7), e11745. doi: 10.1371/journal.pone.0011745
- Osorio-Olvera L., Lira-Noriega, A., Soberón, J., Townsend Peterson, A., Falconi, M., Contreras-Díaz, R.G., Martínez-Meyer, E., Barve, V. and Barve, N. (2020), ntbox: an R package with graphical user interface for modeling and evaluating multidimensional ecological niches. *Methods Ecol Evol.* 11, 1199–1206. doi:10.1111/2041-210X.13452.
- Ostfeld, R. S., and Brunner, J. L. (2015). Climate change and Ixodes tick-borne diseases of humans. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 370(1665), 20140051. <https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0051>
- Pabón, J. D. y Nicholls, R. S. (2005). El cambio climático y la salud humana. *Biomédica*, 25(1), 5-8. Retrieved May 20, 2022, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-41572005000100001&lng=en&tlng=es.
- Pearman, P. B., Guisan, A., Broennimann, O. and Randin, C. F. (2008) Niche dynamics in space and time. *Trends in Ecology and Evolution*, **23**, 149–158. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.11.005>
- Peterson, A. T. (2001). Predicting species geographic distributions based on ecological niche modeling. *The Condor*, 103, 599–605. <https://doi.org/10.1093/condor/103.3.599>
- Peterson, A. T., and Nakazawa, Y. (2008). Environmental data sets matter in ecological niche modelling: an example with *Solenopsis invicta* and *Solenopsis richteri*. *Global ecology and Biogeography*, 17(1), 135-144. doi: 10.1111/j.1466-8238.2007.00347.x
- Peterson, A. T. (2011). Ecological niche conservatism: A time-structured review of evidence. *Journal of Biogeography*, 38(5), 817-827. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02456.x>

- Phillips, S. J., and M. Dudík. (2008). Modeling of species distributions with MAXENT: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* 31: 161-175. Doi: 10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x.
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., Dudík, M., Schapire, R. E., & Blair, M. E. (2017). Opening the black box: An open-source release of Maxent. *Ecography*, 40(7), 887-893. <https://doi.org/10.1111/ecog.03049>
- Ramsey, J. M., Peterson, A. T., Carmona-Castro, O., Moo-Llanes, D. A., Nakazawa, Y., Butrick, M., Tun-Ku, E. de la Cruz-Félix K., and Ibarra-Cerdeña, C. N. (2015). Atlas of Mexican Triatominae (Reduviidae: Hemiptera) and vector transmission of Chagas disease. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, 110, 339-352. <https://dx.doi.org/10.1590/0074-02760140404>
- R-Core Team. (2019). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>
- Rojo-Medina, J., Ruiz-Matus, C., Salazar-Schettino, P. M., and González-Roldán, J. F. (2018). Enfermedad de Chagas en México. *Gaceta Médica de México*, 154(5), 605-612.
- Soberón, J. M. (2007) Grinnellian and Eltonian niche and geographic distribution of species. *Ecology Letters*, **10**, 1115–1123.
- Shuman, E. K. (2010). Global climate change and infectious diseases. *The New England Journal of Medicine*, 362, 1061-1063 DOI: [10.1056/NEJMp0912931](https://doi.org/10.1056/NEJMp0912931)
- Shcheglovitova, M., and Anderson, R. P. (2013). Estimating optimal complexity for ecological niche models: a jackknife approach for species with small sample sizes. *Ecological Modelling*, 269, 9-17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.08.011>
- Torres-Delgado, M. G., Véliz-Deras, F. G., Sánchez-Ramos, F. J., Ruíz-Cancino, E., Martínez-Sifuentes, A. R., Nava-Camberos, U. Ávila-Rodríguez V. y Ortega-Morales, A. I. (2022). Modelado Espacial Actual y Futuro de la Idoneidad de Hábitat de *Triatoma nitida* Usinger en Latinoamérica. *Southwestern Entomologist*, 47(1), 161-176. <https://doi.org/10.3958/059.047.0115>

- Valdez-Tah, A., Huicochea-Gómez, L., Ortega-Canto, J., Nazar-Beutelspacher, A. and Ramsey, J.M. (2015) Social representations and practices towards triatomines and Chagas disease in Calakmul, México. *PLoS One*, 10, e0132830.
- Villalobos, G., Nava-Bolaños, A., Fuentes-Vicente, D., José, A., Téllez-Rendón, J. L., Huerta, H., Martínez-Hernández, F., Rocha-Ortega M., Gutierrez-Cabrera A. E., Ibarra-Castañeda C. N., and Córdoba-Aguilar, A. (2019). A reduction in ecological niche for *Trypanosoma cruzi*-infected triatomine bugs. *Parasites & vectors*, 12(1), 1-9. <https://doi.org/10.1186/s13071-019-3489-5>
- Voldoire, A., Saint-Martin, D., Sénési, S., Decharme, B., Alias, A., Chevallier, M., Colin J., Guérémy J.-F, Michou M., Moine M.-P., Nabat P., Roehrig R., Salas y Mélia D, Séférian R., Valcke S., Beau I., Belamari S., Berthet S., Cassou C., Cattiaux J., Deshayes J., Douville H., Ethé C., Franchistéguy L., Geoffroy O., Lévy C., Madec G., Meurdesoif Y., Msadek R., Ribes A., Sanchez-Gomez E., Terray L., and Waldman R. (2019). Evaluation of CMIP6 DECK experiments with CNRM-CM6-1. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11, 2177– 2213. <https://doi.org/10.1029/2019MS001683>
- Walter, A., Lozano-Kasten, F., Bosseno, M. F., Ruvalcaba, E. G. C., Gutierrez, M. S., Luna, C. E. M., Baunaure, F., Pascale Phélinas, P., Magallón-Gastélum, E., and Breniere, S. F. (2007). Peridomiciliary habitat and risk factors for *Triatoma* infestation in a rural community of the Mexican occident. *The American journal of tropical medicine and hygiene*, 76(3), 508-515.
- Warren, D. L., and Seifert, S. N. (2011). Ecological niche modeling in Maxent: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria. *Ecological applications*, 21(2), 335-342. <https://doi.org/10.1890/10-1171.1>

TABLAS

Tabla1. Datos de ocurrencia de las especies más importantes del género *Triatoma* en América.

Complejo	Especie	Eco zonas	Registros
Lecticularia	<i>T. lecticularia</i>	Neártica	60
	<i>T. sanguisuga</i>	Neártica	462
Protracta	<i>T. barberi</i>	Neártica/Neotropical	842
	<i>T. protracta</i>	Neártica	396
Rubida	<i>T. rubida</i>	Neártica	236
Phyllosoma	<i>T. brailovskyi</i>	Neártica	50
	<i>T. gerstaeckeri</i>	Neártica	614
	<i>T. longipennis</i>	Neártica/Neotropical	839
	<i>T. mazzottii</i>	Neotropical	247
	<i>T. mexicana</i>	Neártica/Neotropical	967
	<i>T. pallidipennis</i>	Neotropical	373
	<i>T. phyllosoma</i>	Neotropical	83
	<i>T. picturata</i>	Neotropical	51
	<i>T. recurva</i>	Neártica	71
Dimidiata	<i>T. dimidiata</i>	Neotropical	2891
Brasiliensis	<i>T. brasiliensis</i>	Neotropical	1079
Infestas	<i>T. infestans</i>	Neotropical	4190
Maculata	<i>T. pseudomaculata</i>	Neotropical	1374
		Total	14825

Tabla 2. Valores obtenidos de la prueba AUC para Entrenamiento y Validación de los mejores modelos del clima actual para cada especie.

Especie	Entrenamiento	Validación	ROC parcial	S.D.
<i>T. barberi</i>	0.859	0.924	1.9	0
<i>T. brailovskyi</i>	0.783	0.934	1.78	0.03
<i>T. brasiliensis</i>	0.83	0.824	1.85	0.01
<i>T. dimidiata</i>	0.815	0.845	1.55	0.01
<i>T. gerstaeckeri</i>	0.809	0.885	1.86	0.01
<i>T. infestans</i>	0.853	0.827	1.65	0.01
<i>T. lecticularia</i>	0.878	0.976	1.78	0.05
<i>T. longipennis</i>	0.871	0.904	1.95	0
<i>T. mazzottii</i>	0.921	0.960	1.67	0.02
<i>T. mexicana</i>	0.849	0.858	1.97	0
<i>T. pallidipennis</i>	0.978	0.997	1.77	0.01
<i>T. phyllosoma</i>	0.902	0.985	1.92	0.02
<i>T. picturata</i>	0.838	0.936	1.99	0
<i>T. protracta</i>	0.830	0.875	1.65	0.02
<i>T. pseudomaculata</i>	0.745	0.757	1.77	0.01
<i>T. recurva</i>	0.862	0.955	1.73	0.03
<i>T. rubida</i>	0.820	0.896	1.85	0.01
<i>T. sanguisuga</i>	0.82	0.876	1.73	0.01

Tabla 3. Valores de la prueba AUC para Entrenamiento y Validación de los mejores modelos del clima futuro para las dieciocho especies del género *Triatoma*.

Especie	CNRM-CM6-1								GFDL-ESM4							
	126				585				126				370			
	E	V	ROC parcial	S.D.	E	V	ROC parcial	S.D.	E	V	ROC parcial	S.D.	E	V	ROC parcial	S.D.
<i>T. barberi</i>	0.974	0.979	1.32	0.01	0.974	0.98	1.99	0	0.974	0.981	1.99	0	0.974	0.98	1.99	0
<i>T. brailovskyi</i>	0.973	0.74	1.95	0.01	0.974	0.986	1.95	0.01	0.97	0.995	1.95	0.01	0.977	0.973	1.95	0.01
<i>T. brasiliensis</i>	0.955	0.957	1.96	0	0.954	0.96	1.96	0	0.954	0.959	1.97	0.01	0.954	0.956	1.96	0.01
<i>T. dimidiata</i>	0.897	0.87	1.89	0	0.897	0.915	1.88	0	0.896	0.91	1.89	0.02	0.894	0.913	1.85	0
<i>T. gerstaeckeri</i>	0.968	0.976	1.97	0	0.969	0.97	1.97	0	0.969	0.973	1.96	0.01	0.968	0.976	1.97	0
<i>T. infestans</i>	0.86	0.866	1.89	0	0.861	0.878	1.88	0	0.861	0.878	1.9	0	0.86	0.863	1.9	0.01
<i>T. lecticularia</i>	0.959	0.998	1.93	0.03	0.961	0.996	1.93	0.03	0.96	0.998	1.93	0.03	0.96	0.999	1.93	0.03
<i>T. longipennis</i>	0.973	0.982	1.99	0	0.973	0.978	1.99	0	0.973	0.976	1.99	0	0.973	0.98	1.99	0
<i>T. mazzottii</i>	0.982	0.991	1.98	0	0.981	0.99	1.98	0	0.983	0.991	1.97	0.01	0.981	0.99	1.98	0.01
<i>T. mexicana</i>	0.983	0.986	1.99	0	0.983	0.987	1.99	0	0.983	0.987	1.96	0.01	0.983	0.987	1.99	0
<i>T. pallidipennis</i>	0.976	0.981	1.99	0	0.976	0.984	1.99	0	0.977	0.981	1.85	0.03	0.976	0.982	1.99	0
<i>T. phyllosoma</i>	0.993	0.997	1.99	0	0.993	0.998	1.99	0	0.993	0.999	1.95	0.06	0.993	0.997	1.99	0
<i>T. picturata</i>	0.996	0.998	2	0	0.996	0.998	1.99	0	0.996	0.999	1.86	0.02	0.996	0.999	2	0
<i>T. protracta</i>	0.954	0.974	1.93	0.01	0.956	0.977	1.94	0.01	0.956	0.98	1.93	0.01	0.955	0.977	1.94	0.01
<i>T. pseudomaculata</i>	0.923	0.929	1.93	0	0.924	0.936	1.93	0	0.922	0.934	1.84	0.03	0.924	0.941	1.93	0
<i>T. recurva</i>	0.966	0.99	1.95	0.02	0.97	0.984	1.95	0.01	0.964	0.997	1.99	0	0.967	0.997	1.95	0.02
<i>T. rubida</i>	0.972	0.986	1.96	0.01	0.974	0.982	1.96	0.01	0.971	0.98	1.96	0.01	0.972	0.986	1.96	0.01
<i>T. sanguisuga</i>	0.946	0.959	1.92	0.01	0.944	0.959	1.92	0.01	0.945	0.959	1.94	0.03	0.944	0.958	1.92	0.01

Tabla 4. Porcentajes de contribución de las principales variables ambientales para cada especie de *Triatoma* en América.

Especie	Actual	CNRM-CM6-1		GFDL-ESM4	
		SSP1-2.6	SSP5-8.5	SSP1-2.6	SSP3-7.0
<i>T. barberi</i>	94.1	95.5	95.6	95.5	95.6
<i>T. brailovskyi</i>	87	96.7	90.8	96.7	90.8
<i>T. brasiliensis</i>	88	98.3	98.6	98.3	98.6
<i>T. dimidiata</i>	93.2	92.6	92.8	92.6	92.8
<i>T. gerstaeckeri</i>	92.5	91.8	91.5	91.8	91.5
<i>T. infestans</i>	92.9	89.8	89.6	89.8	89.6
<i>T. lecticularia</i>	88.7	92.3	93.8	92.3	93.8
<i>T. longipennis</i>	85.5	98.6	97.7	98.6	97.7
<i>T. mazzottii</i>	96.1	92.4	91.7	92.4	91.7
<i>T. mexicana</i>	96.2	90.3	90.8	90.3	90.8
<i>T. pallidipennis</i>	94.8	94.8	95.7	94.8	95.7
<i>T. phyllosoma</i>	82.5	92.6	91.9	94.8	91.9
<i>T. picturata</i>	100	95	91.9	95	91.9
<i>T. protracta</i>	85.9	88.6	91.9	88.6	89.5
<i>T. pseudomaculata</i>	92.4	96.3	91.6	96.3	91.6
<i>T. recurva</i>	97.1	97.6	97.8	97.6	97.8
<i>T. rubida</i>	92.1	95.8	95.8	95.8	95.8
<i>T. sanguisuga</i>	95.5	99	99	99	99

Tabla 5. Áreas totales obtenidas para cada escenario climático modelado.

2041-2060	CLIMA ACTUAL		CNRM-CM6-1		GFDL-ESM4	
	PMC	AMERICA	SSP1-2.6	SSP5-8.5	SSP1-2.6	SSP3-7.0
<i>T. barberi</i>	81,086	120,640	13,274	37,892	15,692	9,844
<i>T. brailovskyi</i>	152,428	8,533,457	69,849	63,080	72,535	36,509
<i>T. brasiliensis</i>	694,122	2,609,949	226,384	328,219	316,058	348,534
<i>T. dimidiata</i>	986,595	5,197,878	72,535	635,100	493,776	456,240
<i>T. gerstaeckeri</i>	148,899	1,712,360	22,368	23,496	54,992	16,883
<i>T. infestans</i>	956,037	1,061,044	1,295,256	1,337,945	2,100,168	2,023,896
<i>T. lecticularia</i>	100,841	1,095,326	622	771	2,149	15,036
<i>T. longipennis</i>	171,122	639,599	80,870	120,930	130,721	175,875
<i>T. mazzottii</i>	53,682	3,701,603	3,380	13,193	1,427	2,553
<i>T. mexicana</i>	16,237	140,798	17,838	19,141	35,369	27,183
<i>T. pallidipennis</i>	26,211	2,081,911	101	37	201	67
<i>T. phyllosoma</i>	13,458	2,840,506	107	156	1,239	54
<i>T. picturata</i>	41,581	1,645,689	491	657	1,460	7,161
<i>T. protracta</i>	724,244	4,124,477	255,690	155,822	174,184	139,295
<i>T. pseudomaculata</i>	1,102,345	2,609,586	697,399	769,294	684,424	755,112
<i>T. recurva</i>	112,765	13,436,355	2,669	12,823	17,491	10,608
<i>T. rubida</i>	393,297	4,357,388	47,708	38,323	44,196	40,694
<i>T. sanguisuga</i>	1,846,055	3,077,783	415,867	423,217	344,646	79,941
Total	7, 621,007	58, 986,348	3, 222,409	3, 980,095	4, 490,729	4, 145,484

Tabla 6. Países con presencia de áreas potenciales de invasión para cada especie bajo condiciones de clima actual y proyecciones futuras.

2041-2060	AMERICA				
	ACTUAL	CNRM-CM6-1		GFDL-ESM4	
		SSP1-2.6	SSP5-8.5	SSP1-2.6	SSP3-7.0
<i>T. barberi</i>	México, Honduras, Ecuador, Perú, Bolivia, Brasil, Paraguay, Argentina, Ecuador	México, Brasil, Bolivia, Argentina	México, Honduras, Ecuador, Perú, Bolivia, Brasil, Argentina, Guatemala, El Salvador, Chile	México, Bolivia, Brasil, Argentina	México, Bolivia, Brasil, Argentina
<i>T. brailovskyi</i>	México, Belice, Guatemala, Honduras, El Salvador, Costa Rica, Panamá, Colombia, Venezuela, Guyana, Guyana Francesa, Trinidad y Tobago, Ecuador, Perú/Jamaica, Haití, República Dominicana, Islas Británicas	México, Brasil, Argentina, Bolivia	México, Brasil, Argentina, Bolivia	México, Brasil, Argentina	México, Brasil, Argentina
<i>T. brasiliensis</i>	México, Belice, Honduras, El Salvador, Nicaragua, Colombia, Venezuela, Guyana, Brasil, Ecuador, Perú, Paraguay/Cuba, República Dominicana	México, Brasil, Venezuela, Perú	México, Brasil, Venezuela, Perú	México, Brasil, Venezuela, Perú, Bolivia	México, Honduras, Venezuela, Perú, Brasil, Bolivia
<i>T. dimidiata</i>	México, Guatemala, Honduras, El Salvador, Brasil, Bolivia, Argentina/Cuba, República Dominicana	México, Perú, Brasil, Bolivia, Guatemala, Honduras, Nicaragua, Argentina/Cuba, Haití, república Dominicana, Bahamas, Jamaica	México, Honduras, Nicaragua, Venezuela, Colombia, Perú, Bolivia, Brasil, Argentina/Bahamas, Cuba, Haití, República Dominicana	México, Guatemala, Honduras, Nicaragua, Venezuela, Perú, Brasil, Bolivia, Argentina/Bahamas, Cuba, Haití, República Dominicana, Jamaica	México, Belice, Guatemala, Honduras, Nicaragua, Colombia, Venezuela, Guyana, Perú, Brasil, Bolivia, Paraguay, Argentina/Bahamas, Cuba, Haití, República Dominicana
<i>T. gerstaeckeri</i>	México, Guatemala, Honduras, Colombia, Brasil, Ecuador, Perú, Bolivia, Paraguay, Argentina, Chile/República Dominicana	México, Argentina	México, Brasil, Argentina, Chile	México, Brasil, Argentina,	México, Brasil, Bolivia, Argentina, Perú
<i>T. infestans</i>	Argentina, Bolivia	México, Bolivia, Argentina, Brasil	México, Bolivia, Argentina, Brasil	México, Bolivia, Argentina, Brasil	México, Brasil, Argentina, Bolivia
<i>T. lecticularia</i>	México, Honduras, Colombia, Venezuela, Trinidad y Tobago, Guyana, Guyana Francesa, Surinam, Brasil, Ecuador, Perú, Bolivia, Paraguay, Argentina, Chile/Cuba, República Dominicana, Jamaica	México, Argentina	México, Argentina	México, Argentina	México, Argentina

<i>T. longipennis</i>	México, Brasil, Argentina, Bolivia	México, Honduras, Brasil, Bolivia, Argentina	México, Honduras, Brasil, Bolivia, Argentina, Nicaragua	México, Honduras, Brasil, Bolivia, Argentina	México, Honduras, Brasil, Bolivia, Argentina
<i>T. mazzottii</i>	México, Belice, Guatemala, El Salvador, Nicaragua, Panamá, Costa Rica, Colombia, Venezuela, Ecuador, Perú, Guyana Francesa, Brasil	México, Guatemala, Honduras, Nicaragua, Brasil, Bolivia	México, Honduras, Guatemala, Brasil, Bolivia	México, Honduras, Nicaragua, Brasil, Bolivia	México, Honduras, Nicaragua, Brasil
<i>T. mexicana</i>	México, Honduras, El Salvador, Colombia, Ecuador, Perú, Brasil, Paraguay, Argentina, Bolivia, Chile	México, Brasil, Bolivia, Argentina	México, Honduras, Brasil, Perú, Bolivia, Argentina	México, Perú, Bolivia, Brasil, Argentina	México, Honduras, Brasil, Perú, Bolivia, Argentina
<i>T. pallidipennis</i>	México, Belice, Guatemala, Honduras, El Salvador, Nicaragua, Costa Rica, Panamá, Colombia, Venezuela, Guyana, Guyana Francesa, Surinam, Brasil, Bolivia, Argentina, Paraguay	México, Bolivia, Argentina, Brasil	México, Honduras, Nicaragua, Brasil, Bolivia, Argentina	México, Bolivia, Argentina, Brasil	México, Honduras, Brasil, Bolivia, Argentina
<i>T. phyllosoma</i>	México, Belice, Nicaragua, Guatemala, El Salvador, Colombia, Venezuela, Guyana, Guyana Francesa, Surinam, Brasil, Bolivia, Ecuador, Perú, Paraguay, Argentina/Cuba, Jamaica, Haití, república Dominicana	México, Honduras, Brasil, Bolivia	México, Honduras, Nicaragua, Venezuela, Perú, Bolivia, Brasil	México, Honduras, Nicaragua, Argentina, Bolivia, Brasil	México, Honduras, Nicaragua, Brasil, Bolivia, Argentina
<i>T. picturata</i>	México, Ecuador, Bolivia, Brasil, Venezuela, Paraguay, Colombia, Argentina/Cuba, República Dominicana	México, Brasil, Honduras, Argentina	México, Honduras, Brasil, Bolivia, Argentina, Chile	México, Honduras, Brasil, Bolivia, Argentina	México, Brasil, Bolivia, Argentina
<i>T. protracta</i>	México, Colombia, Venezuela, Ecuador, Perú, Brasil, Paraguay, Argentina, Chile	México, Bolivia, Argentina	México, Argentina	México, Bolivia, Argentina	México, Argentina
<i>T. pseudomaculata</i>	México, Nicaragua, Guatemala, Honduras, El Salvador, Colombia, Venezuela, Ecuador, Perú, Brasil, Guyana, Bolivia, Paraguay/Cuba, república Dominicana, Jamaica, Haití	México, Honduras, Nicaragua, Venezuela, Perú, Bolivia, Brasil	México, Honduras, Nicaragua, Venezuela, Perú, Bolivia, Brasil, Colombia	México, Honduras, Nicaragua, Colombia, Venezuela, Perú, Brasil, Bolivia	México, Honduras, Nicaragua, Colombia, Venezuela, Perú, Brasil, Bolivia
<i>T. recurva</i>	México, Belice, Nicaragua, Guatemala, El Salvador, Costa Rica, Panamá, Colombia, Venezuela, Surinam, Aruba, Curazao, Trinidad y Tobago, Guyana, Guyana Francesa, Surinam, Brasil, Ecuador, Perú, Bolivia, Paraguay, Argentina/Cuba, Jamaica, Bahamas, Islas Caimán, Haití, República Dominicana, Islas Británicas	México, Bolivia, Brasil, Argentina	México, Argentina	México, Brasil, Argentina	México, Argentina
<i>T. rubida</i>	México, Ecuador, Argentina, Brasil, Paraguay	México, Bolivia, Argentina	México, Bolivia, Argentina	México, Argentina	México, Argentina
<i>T. sanguisuga</i>	México, Brasil, Paraguay, Chile, Argentina, Uruguay	Brasil, Chile, Argentina, Uruguay, Paraguay	Brasil, Uruguay	Brasil, Uruguay	Brasil, Uruguay

CLIMA ACTUAL

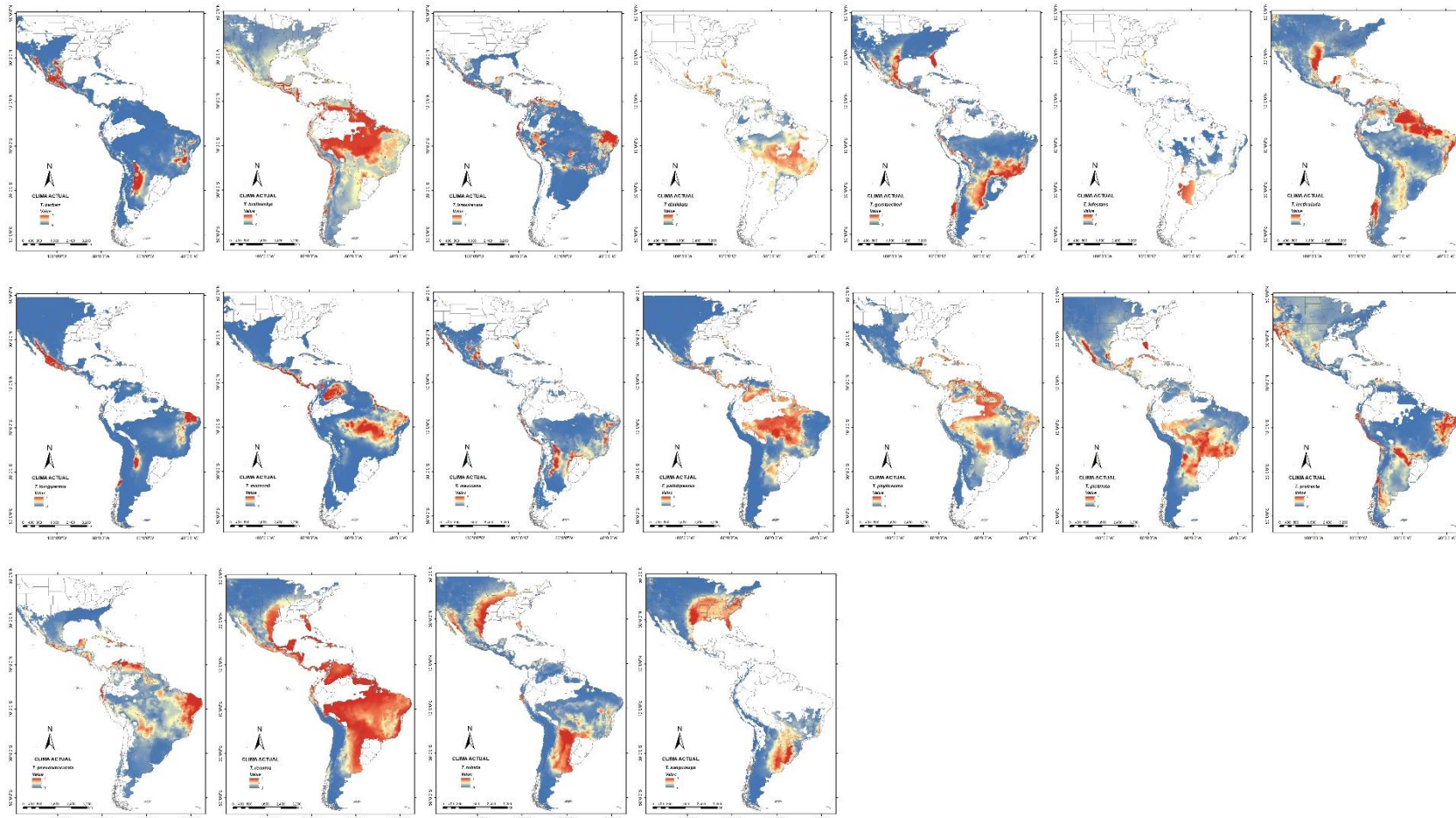


Figura 1. Zonas de distribución potencial para las especies del género *Triatoma* bajo condiciones del clima actual para América.

CNRM-CM6-1 SSP1-2.6

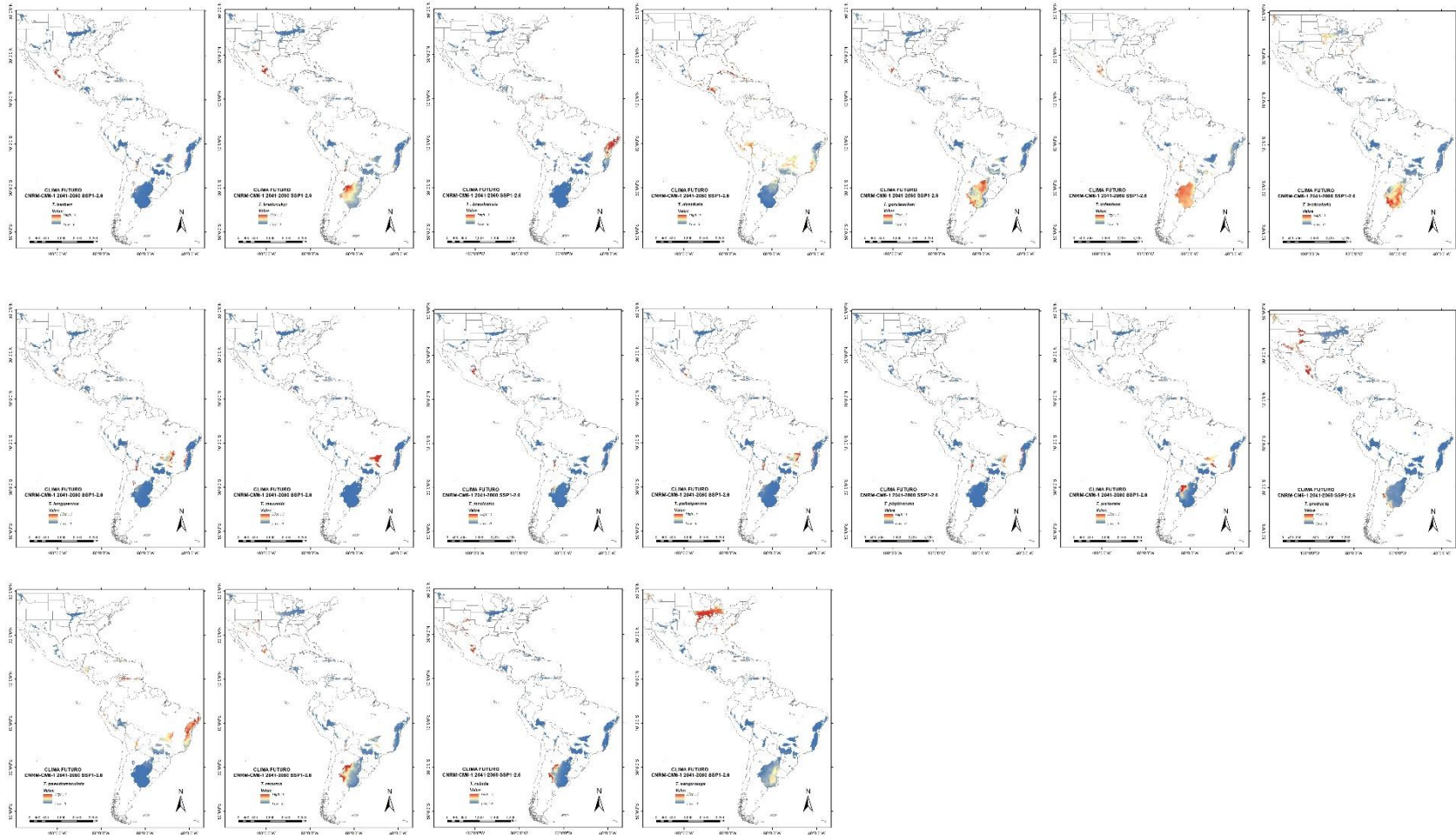


Figura 2. Zonas de distribución potencial para las especies del género *Triatoma* bajo condiciones del Clima actual para América.

CNRM-CM6-1 SSP5-8.5

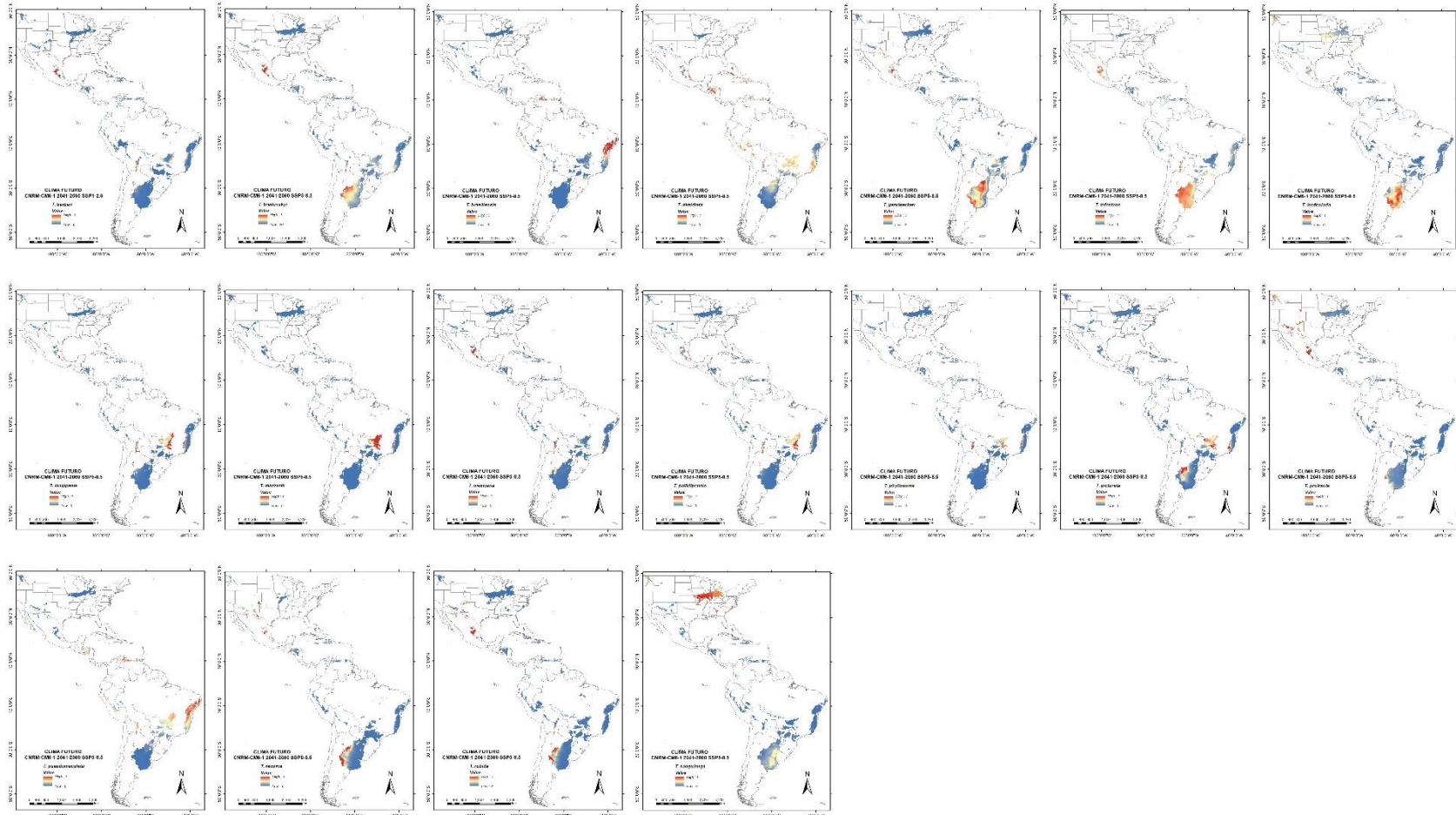


Figura 3. Zonas de distribución potencial para las especies del género *Triatoma* bajo condiciones del Clima actual para América.

GFDL-ESM4 SSP1-2.6

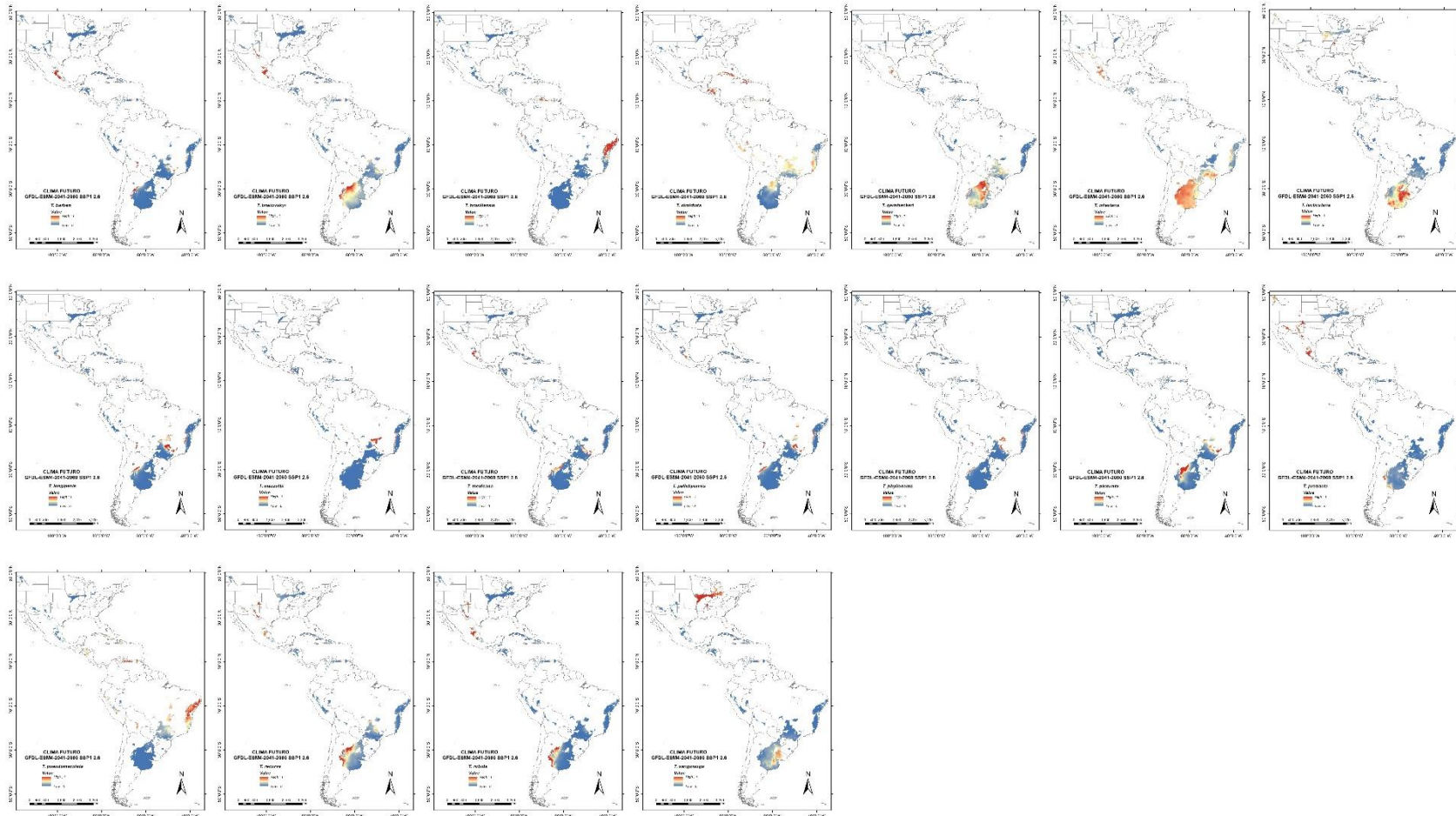


Figura 4. Zonas de distribución potencial para las especies del género *Triatoma* bajo condiciones del Clima actual para América.

GFDL-ESM4 SSP3-7.0

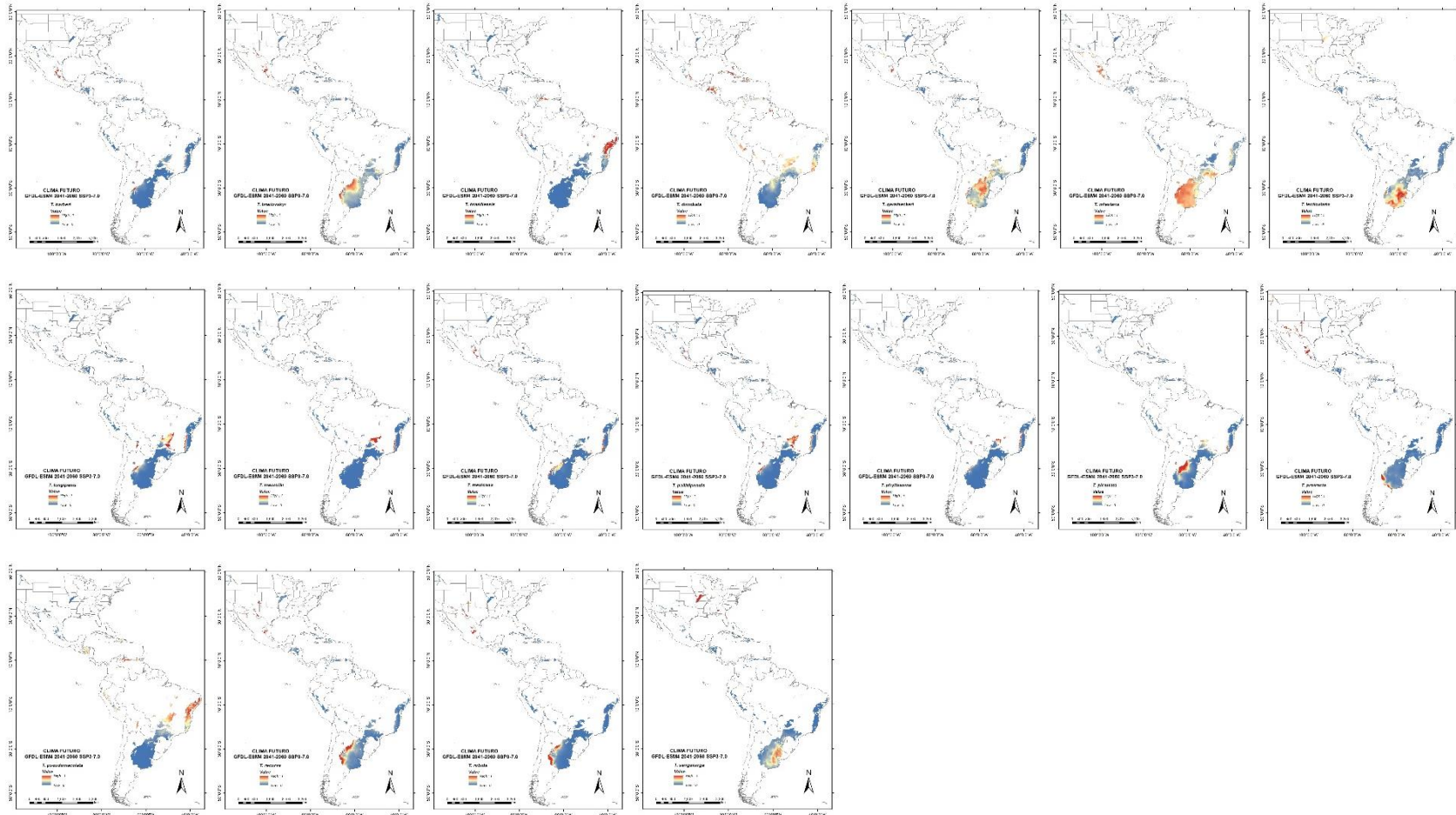


Figura 5. Zonas de distribución potencial para las especies del género *Triatoma* bajo condiciones del Clima actual para América.

6. CONCLUSIONES GENERALES

En conclusión, es posible mencionar que las especies del género *Triatoma* se ven afectadas por efectos del cambio climático, aumentando o disminuyendo el área de distribución actual, forzando a las especies a adaptarse a nuevos entornos geográficos y por ende modificando los patrones epidemiológicos. Los diferentes escenarios de cambio climático para los años 2041-2060 y 2081-2100, muestran disminución y dispersión para todas las especies de importancia médica, por lo tanto, es de suma importancia la reestructuración de la planeación del manejo y/o erradicación de las especies principalmente las domiciliarias y peridomiciliarias, sin descuidar las potenciales especies selváticas en todos los países de América.