

Georeferenciación e impacto del cambio climático en la incidencia de rickettsiosis en el Área Metropolitana de Nuevo León: estudio de 10 años

Paul S. Arcos-Viscarra,^{1,2} José I. Castillo-Bejarano,^{1,2*} Abiel H. Mascareñas-de los Santos,^{1,2} Denisse N. Vaquera-Aparicio,^{1,2} Ana S. Guerrero-Delgado,^{1,2} Vanesa Berumen-Millán^{1,2} y Erika A. Larragoity-González^{1,2}

¹Departamento de Pediatría; ²Servicio de Enfermedades Infecciosas. Hospital Universitario "Dr. José Eleuterio González", Monterrey, Nuevo León, México

Resumen

Antecedentes: La rickettsiosis es una enfermedad transmitida por vectores en México, en la cual *Rickettsia rickettsii* representa el principal patógeno en el norte. El cambio climático impulsa la expansión del vector, pese a esto, su impacto en la rickettsiosis se mantiene incierto. **Objetivo:** El estudio evalúa la relación entre variables climáticas y la incidencia de rickettsiosis en Nuevo León en 11 años. **Materiales y métodos:** Se realizó un estudio ecológico longitudinal utilizando datos del 2013 al 2024. Se utilizó el análisis de correlación de Pearson para evaluar la asociación entre el clima y la enfermedad, seguido de un análisis con el modelo de regresión de Poisson (adecuado para analizar conteos de casos). Se visualizaron patrones espaciales mediante un mapa de densidad y se identificaron clústeres mediante un análisis DBSCAN (Agrupación Espacial Basada en la Densidad de Aplicaciones con Ruido). **Resultados:** Se analizaron 381 casos. La temperatura mínima influyó positivamente en la incidencia ($p = 0.003$). La temperatura máxima tuvo una relación positiva significativa ($p < 0.001$). La precipitación afectó negativamente la incidencia ($p = 0.035$). El análisis DBSCAN identificó la presencia de clústeres. **Conclusiones:** Nuestros hallazgos vinculan directamente estas variables con la incidencia de rickettsiosis en Nuevo León, destacando la relación entre la temperatura, la precipitación y la enfermedad. Estos resultados ponen de relieve la importancia de las estrategias de salud pública basadas en datos climáticos.

PALABRAS CLAVE: Rickettsiosis. Cambio climático. Enfermedades transmitidas por vectores. Temperatura. Precipitación.

Spatial distribution and climate change impact on rickettsiosis incidence in the Metropolitan Area of Nuevo León: a 10-year analysis

Abstract

Background: Rickettsiosis is a vector-borne disease in Mexico, with *Rickettsia rickettsii* as the primary pathogen in the north. Climate change drives vector expansion, yet its impact on rickettsiosis incidence remains unclear. **Objective:** This study evaluates the association between climate variables and rickettsiosis incidence in the Metropolitan Area of Nuevo León, Mexico, over 11 years. **Materials and methods:** A longitudinal ecological study was conducted using data from 2013 to 2024. Pearson correlation analysis assessed climate-disease associations, followed by Poisson regression modeling. Spatial patterns were visualized utilizing a case density map and density-based spatial clustering of applications with noise (DBSCAN) analysis identified clusters. **Results:** 381 cases were analyzed. Minimum temperature showed a positive association with incidence ($p = 0.003$). Maximum temperature had a significant positive relationship ($p < 0.001$). Precipitation negatively affected incidence

*Correspondencia:

José I. Castillo-Bejarano
E-mail: jicastillobejarano@gmail.com

Fecha de recepción: 02-04-2025

Fecha de aceptación: 01-09-2025

DOI: 10.24875/GMM.M26001083

Gac Med Mex. 2026;162:199-207

Disponible en PubMed

www.gacetamedicademexico.com

0016-3813/© 2025 Academia Nacional de Medicina de México, A.C. Publicado por Permanyer. Este es un artículo open access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

($p = 0.035$). DBSCAN analysis revealed four main clusters in Monterrey's metropolitan area. **Conclusions:** Our findings link climatic variables to rickettsiosis incidence in Nuevo León, highlighting the relationship between temperature, precipitation, and disease. These results emphasize climate-informed public health strategies.

KEYWORDS: Rickettsiosis. Climate change. Vector-borne diseases. Temperature. Precipitation.

Introducción

Las enfermedades transmitidas por vectores representan una amenaza creciente para la salud pública mundial. Estas enfermedades, causadas por agentes infecciosos y transmitidas por organismos como garrapatas, mosquitos y pulgas, dependen en gran medida de factores ambientales para su distribución y persistencia.¹ Entre estos factores, el cambio climático ha surgido como un determinante clave, alterando la distribución geográfica y la estacionalidad de los vectores, facilitando la aparición y reaparición de enfermedades en nuevas regiones.²

El aumento de las temperaturas, los cambios en los patrones de precipitación y la prolongación de las estaciones cálidas han creado nichos ecológicos en áreas previamente inhóspitas, permitiendo la expansión de vectores y patógenos.³ La evidencia respalda esta relación: un estudio de 2022 confirmó que el cambio climático acelera la propagación de *Ixodes* en Europa, incrementando la enfermedad de Lyme y la encefalitis transmitida por garrapatas. Además, los modelos han demostrado ser útiles para mapear estos cambios geográficos bajo diferentes escenarios climáticos, proporcionando información crucial para la vigilancia y el control de enfermedades.⁴

La temperatura media global de la superficie ha aumentado en 1.5 °C comparado con los niveles preindustriales.⁵ No obstante, el incremento ha sido aún más pronunciado en muchas regiones y durante ciertas estaciones. Esto es evidente en el Ártico, donde, el 20 de junio de 2020, se registró una temperatura récord de 38 °C en Verkhoyansk (Rusia), un lugar que normalmente presenta temperaturas cercanas a 20 °C.⁶ Incluso durante el invierno, se ha observado un calentamiento significativo, con aumentos de temperatura de 3 a 4 °C en los últimos 50 años en regiones como Alaska y el oeste de Canadá.⁷

Las actividades humanas son los principales impulsores de las emisiones de gases de efecto invernadero, incluidos el dióxido de carbono, el metano y el óxido nitroso. Estos gases se han ido acumulando en la atmósfera en concentraciones crecientes, intensificando el efecto invernadero y contribuyendo al calentamiento global continuo.⁸

El consenso científico sobre el cambio climático es más sólido de lo que a menudo se percibe; se reconoce ampliamente que el calentamiento inducido por el ser humano es responsable del aumento en la frecuencia e intensidad de las olas de calor, los eventos de precipitación extrema y las sequías.^{5,8} A pesar de la bien establecida conexión entre el cambio climático y los cambios ecológicos, la literatura sobre su impacto en las garrapatas y las enfermedades que transmiten sigue siendo relativamente limitada.

Las garrapatas son organismos “de sangre fría”, lo que significa que dependen de la temperatura ambiental para regular su propia temperatura corporal.⁹ Varias características biológicas las hacen sensibles a las condiciones climáticas, incluida su vida relativamente larga, de hasta 5 años en algunas especies, y su capacidad de pasar la mayor parte de su ciclo de vida fuera del huésped, lo que hace que los factores ambientales influyan significativamente en su fisiología y comportamiento.¹⁰

La retención de agua es crítica para su supervivencia, y las garrapatas poseen adaptaciones anatómicas especializadas; por ejemplo, sus glándulas salivales producen sustancias que les permiten absorber vapor de agua del aire. Además, su capa lipídica desempeña un papel crucial en la conservación del agua. La adquisición de nutrientes es otro determinante clave de su metabolismo y éxito reproductivo, ya que dependen completamente de la sangre de huéspedes vertebrados, variando la selección del huésped según sus características ecológicas y conductuales.

Las especies de garrapatas presentan diversas preferencias de hábitat y comportamientos de búsqueda de hospedador. Las garrapatas exofílicas, como *Ixodes scapularis* (garrapata del ciervo), habitan en ambientes abiertos como bosques o pastizales, donde realizan “questing”, posicionándose en la vegetación y esperando el paso de un huésped. En cambio, las garrapatas endofílicas, como *Ornithodoros* spp., prefieren hábitats cerrados como madrigueras, nidos o cuevas, donde se alimentan de animales residentes. Además, las garrapatas pueden clasificarse como generalistas o especialistas. Las garrapatas generalistas, como *Dermacentor variabilis* (garrapata

del perro americano), se alimentan de mamíferos, aves y reptiles, mientras que las especialistas, como *Ixodes hexagonus*, parasitan principalmente a un grupo específico de huéspedes, como los erizos.^{10,11}

Aunque el cambio climático influye en las poblaciones de garrapatas y en la transmisión de patógenos, no es el único determinante. La compleja interacción entre garrapatas, hospedadores y patógenos forma una tríada dinámica, en la que las alteraciones en cualquiera de sus componentes pueden modificar la dinámica de las enfermedades, aunque no necesariamente debido exclusivamente al cambio climático. Distinguir los efectos del cambio climático de otros factores ecológicos, biológicos y antropogénicos sigue siendo un desafío importante.

Este estudio busca proporcionar evidencia empírica sobre cómo la temperatura y la precipitación durante los últimos 11 años han influido en la incidencia de rickettsiosis en Nuevo León, un estado del noreste de México caracterizado por un clima árido, con una temperatura media anual de 20 °C y una precipitación anual de 650 mm.¹²

Materiales y métodos

Este estudio emplea un diseño ecológico longitudinal, incorporando un análisis de series temporales que abarca de 2013 a 2024 en Nuevo León, México. Se analizaron un total de 381 casos, incluyendo pacientes entre 0 y 16 años con prueba confirmatoria de rickettsiosis, provenientes de dos centros hospitalarios: Hospital Universitario “Dr. José Eleuterio González” y Hospital Regional Materno Infantil de Alta Especialidad. Los datos sobre casos anuales de rickettsiosis se obtuvieron de los boletines epidemiológicos del Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica. Los datos climáticos históricos de Nuevo León se obtuvieron del Servicio Meteorológico Nacional. El conjunto de datos incluye variables ambientales como temperatura media, mínima y máxima anual, así como precipitación total.

La variable dependiente es la incidencia de rickettsiosis, expresada como casos anuales descritos. Las variables independientes incluyeron temperatura media, mínima y máxima (°C) y precipitación total anual (mm) durante 11 años.

Análisis estadístico

El abordaje incluyó un análisis descriptivo para identificar tendencias en la incidencia de rickettsiosis

y variaciones climáticas. El coeficiente de correlación de Pearson evaluó la relación entre la incidencia y las variables climáticas, con significancia estadística en $p < 0.05$.

Para evaluar la asociación entre factores climáticos e incidencia, se empleó el modelo de regresión de Poisson, adecuado para el análisis de conteo de casos, ya que evita sesgos en variables con distribuciones asimétricas. El modelo sigue la ecuación:

$$\log(\lambda) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4$$

Donde: λ representa la incidencia esperada de rickettsiosis, β_0 es la intersección, X_1 , X_2 , X_3 y X_4 corresponden a variables climáticas (precipitación, temperatura media, mínima y máxima) y β_1 , β_2 , β_3 y β_4 son los coeficientes estimados.

Análisis geoespacial

El ajuste del modelo se realizó mediante estimación de máxima verosimilitud, y los resultados se expresaron como razón de tasas de incidencia (IRR) con intervalos de confianza del 95% (IC 95%). La adecuación del modelo se evaluó mediante la prueba de bondad de ajuste χ^2 de Pearson y el Pseudo R^2 , una medida utilizada para evaluar el ajuste de modelos no lineales como la regresión de Poisson, comparando el modelo con uno nulo. En aquellos casos en los que se detectó variabilidad excesiva en los datos (varianza mayor que la media), se consideró un modelo de regresión binomial negativa.

Para evaluar la distribución geoespacial de los casos de rickettsiosis, se realizó un análisis de casos con reportes de 2 hospitales en Nuevo León durante los últimos 5 años: Hospital Universitario “Dr. José Eleuterio González” y Hospital Regional Materno Infantil de Alta Especialidad. Se utilizaron herramientas de visualización geográfica en el análisis.

Se generó un mapa de estimación de densidad para visualizar la densidad de casos, utilizando datos georeferenciados para identificar conglomerados de alta incidencia. *Kernel Density Estimation* (KDE), un proyecto de software de código abierto, creó una superficie continua de densidad calculando concentraciones dentro de un ancho de banda definido, suavizando puntos individuales para resaltar patrones. Las bibliotecas de Python transformaron los códigos postales de los pacientes en coordenadas geográficas para el análisis espacial. Pandas procesó y depuró el conjunto de datos. Geopandas creó un archivo GeoJSON para el análisis geoespacial. La biblioteca Folium

generó un mapa interactivo en HyperText Markup Language (HTML).

Para determinar la agrupación espacial, el algoritmo DBSCAN identificó conglomerados de alta densidad de casos. Tras probar varios parámetros, se seleccionó un radio espacial óptimo (ϵ) de 0.03 (3 km), asegurando conglomerados significativos sin fusionar áreas distintas. Este enfoque metodológico permitió un análisis geoespacial preciso y la visualización de los casos de rickettsiosis en el área metropolitana, abarcando 10 municipios.

Resultados

Entre 2013 y 2024, se analizaron la temperatura, la precipitación y los casos de rickettsiosis en Nuevo León para evaluar posibles asociaciones entre factores climáticos y la incidencia de la enfermedad. La figura 1 ilustra una serie temporal de los casos de rickettsiosis en Nuevo León durante el periodo mencionado. Los hallazgos proporcionan información sobre las influencias ambientales en la epidemiología de la rickettsiosis.

La precipitación media anual fue de 600 mm (entre 550 mm y 640 mm) y la DE = 27.3 mm, lo cual es indicativo de una variabilidad interanual moderada. En cuanto a la temperatura, el valor medio anual se situó entre 21.5 y 23.0 °C, con un promedio general de 22.3 °C. La variación fue relativamente baja, con una DE = 0.52 °C, lo cual sugiere condiciones térmicas estables durante el periodo de estudio.

Los casos de rickettsiosis mostraron fluctuaciones sustanciales, con una media anual de 32.7 casos, con un rango de 7 a 94 casos y una DE = 27.6, lo cual refleja una alta variabilidad en la incidencia de la enfermedad. Fluctuaciones que podrían deberse a factores ambientales o sociales no explorados en este análisis.

Análisis de correlación

Para examinar la relación entre las variables climáticas y la incidencia de rickettsiosis, se realizó un análisis de correlación de Pearson:

La precipitación anual mostró una correlación negativa moderada con los casos de rickettsiosis ($r = -0.59$; $p = 0.04$), lo cual sugiere que una menor precipitación podría estar asociada a un mayor número de casos. La temperatura media anual mostró una correlación positiva débil con la incidencia de la enfermedad ($r = 0.37$; $p = 0.23$), lo cual sugiere que el aumento

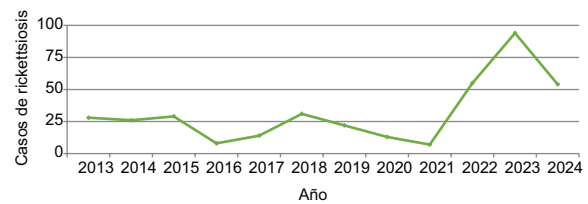


Figura 1. Serie temporal de casos de rickettsiosis en Nuevo León (2013-2024). Se observa un aumento notable de casos en 2022-2023, seguido de una disminución en 2024.

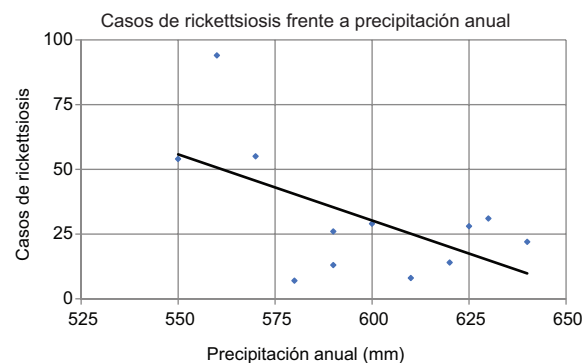


Figura 2. El eje x representa la precipitación anual en milímetros y el eje y representa el número de casos de rickettsiosis. Diagrama de dispersión que muestra la relación entre la precipitación anual (mm) y los casos de rickettsiosis en Nuevo León. Se observa una tendencia negativa, indicando que niveles más altos de precipitación se asocian con menos casos descritos.

de la temperatura media podría tener un impacto limitado en la incidencia de rickettsiosis. La temperatura mínima presentó una correlación positiva moderada ($r = 0.55$; $p = 0.065$), mientras que la temperatura máxima también mostró una correlación positiva moderada ($r = 0.52$; $p = 0.081$) con la incidencia de la enfermedad. Estas correlaciones no fueron estadísticamente significativas.

Regresión de Poisson: asociación significativa entre el clima y la rickettsiosis

Precipitación anual: se confirmó una asociación inversa significativa ($p = 0.035$) con un IRR = 0.99 (IC 95%, 0.98-1.0). En este sentido, se puede concluir que un aumento en la precipitación se asocia con una disminución en el número esperado de casos de rickettsiosis, lo que proporciona evidencia adicional que respalda la hipótesis de que las condiciones áridas favorecen la aparición de la enfermedad.

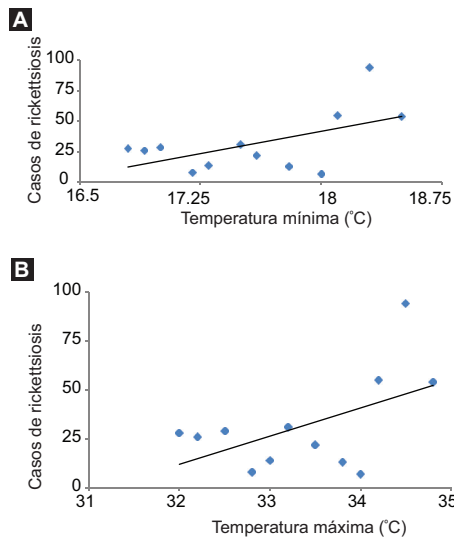


Figura 3. A: el eje x representa la temperatura mínima (°C) y el eje y, el número de casos de rickettsiosis. Diagrama de dispersión que muestra la relación entre la temperatura mínima (°C) y los casos de rickettsiosis en Nuevo León. Se observa una tendencia positiva, indicando que temperaturas mínimas más altas se asocian con un aumento de casos descritos. **B:** el eje x representa la temperatura máxima (°C) y el eje y representa el número de casos de rickettsiosis. Diagrama de dispersión que muestra la relación entre la temperatura máxima (°C) y los casos de rickettsiosis en Nuevo León. Se observa una tendencia positiva, lo cual es indicativo de que temperaturas máximas más altas se asocian con un aumento de casos descritos.

La figura 2 ilustra esta correlación negativa, indicando que niveles más altos de precipitación se asocian con menos casos descritos.

Temperatura mínima: esta variable presentó la asociación positiva más fuerte, demostrando una relación altamente significativa ($p = 0.003$) con un IRR = 132.4 (IC 95%, 5.09-3443.15). El amplio IC 95% (5.09-3443.15) indica un grado considerable de incertidumbre, que podría atribuirse al tamaño de muestra limitado, condiciones de exposición variables o escasez de datos en categorías específicas. No obstante, este resultado podría, asimismo, indicar un fenómeno de umbral, donde temperaturas mínimas inusualmente altas desencadenan mecanismos biológicos (por ejemplo, una mayor actividad de búsqueda de hospedador) que aumentan notablemente el riesgo de transmisión.

La figura 3A muestra una tendencia ascendente clara, indicando que temperaturas mínimas más altas se corresponden con un mayor número de casos descritos.

Nuestro análisis reveló que existe una relación positiva significativa ($p < 0.001$) entre la temperatura máxima y los casos de rickettsiosis. El modelo de

Poisson mostró un IRR = 1.595 (IC 95%, 1.41-1.80), lo cual es indicativo de que por cada incremento de 1 °C en la temperatura máxima, la incidencia de rickettsiosis aumenta en un 59.5%. Esto sugiere que las olas de calor o los días extremadamente calurosos podrían desempeñar un papel crítico en el desencadenamiento de brotes. La figura 3B refleja una tendencia ascendente, lo cual sugiere que temperaturas máximas más elevadas contribuyen al aumento de la transmisión de la enfermedad. No se reportó un valor de p significativo en el análisis de la temperatura media ($p = 0.6$), lo que indica que no existe una asociación relevante entre la temperatura media y la incidencia de casos en este modelo.

Estos hallazgos indican que el análisis de correlación subestimó algunas asociaciones que fueron identificadas como significativas en el modelo de regresión de Poisson. La capacidad del análisis de regresión para ajustar simultáneamente múltiples factores permitió una estimación más precisa de las relaciones en datos de conteo, como los casos de rickettsiosis.

Análisis geoespacial

La distribución geoespacial de los casos de Rickettsiosis en Nuevo León reveló patrones de agrupamiento dentro del área metropolitana de Monterrey, con puntos de alta densidad en zonas urbanas y periurbanas (Figura 4).

Utilizando DBSCAN, se determinó que la distribución espacial no era aleatoria, con conglomerados bien definidos en ubicaciones específicas. El análisis requirió, como mínimo, 3 casos por conglomerado e identificó cuatro conglomerados principales. Nueve casos aislados se encontraban geográficamente distantes, lo cual sugiere una posible transmisión esporádica fuera del área metropolitana.

Los conglomerados se concentraron principalmente en la región central de Nuevo León, todos dentro del área metropolitana de Monterrey:

- El conglomerado 0 (25 casos) es el más grande, ubicado en el centro-norte de Monterrey, incluido el noroeste de Monterrey y municipios suburbanos adyacentes. Este conglomerado indica una alta concentración en áreas densamente pobladas.
- El conglomerado 1 (15 casos) se localiza en la periferia occidental metropolitana y abarca García y Santa Catarina, lo cual sugiere un foco secundario.

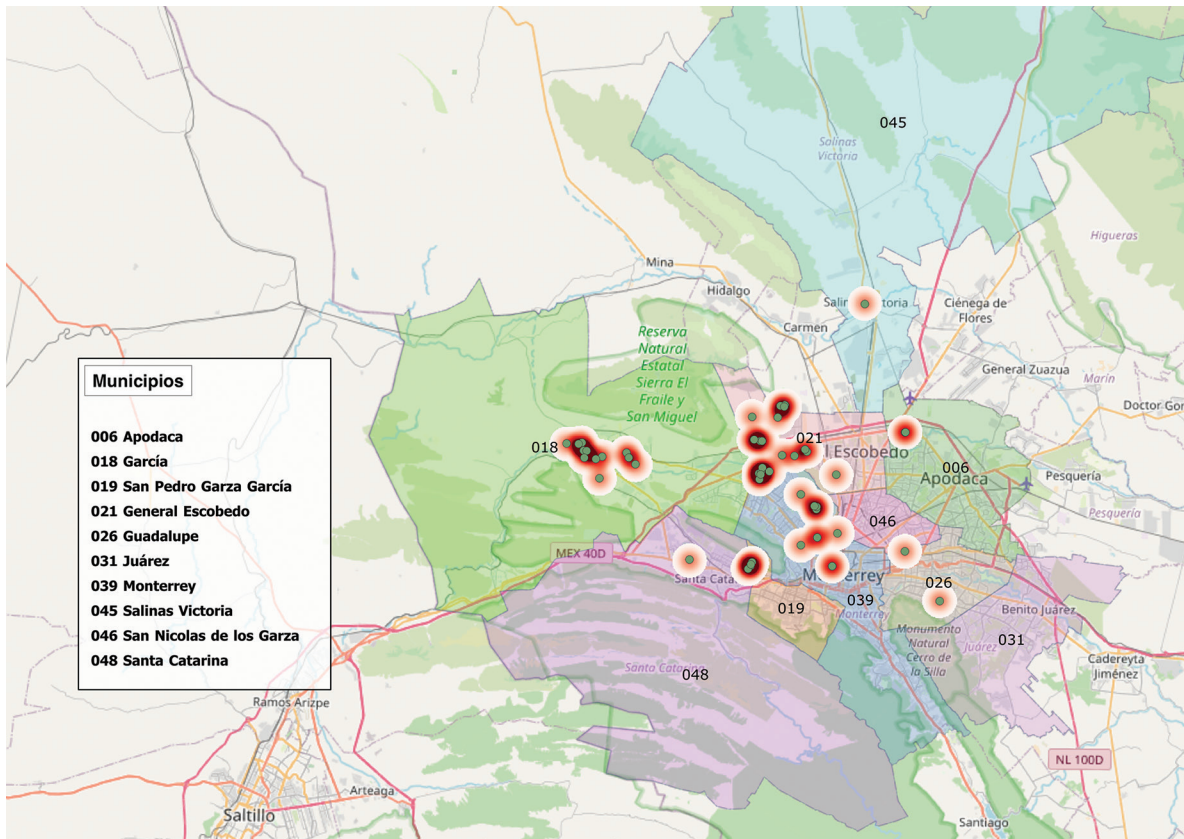


Figura 4. Mapa de densidad de casos que muestra la distribución geoespacial de los casos de rickettsiosis en el área metropolitana de Monterrey. Se observan conglomerados de alta incidencia en municipios como Monterrey, García y General Escobedo. Los datos de casos fueron georreferenciados utilizando códigos postales y analizados con herramientas de visualización espacial para identificar áreas con mayor concentración de la enfermedad.

- El conglomerado 2 (9 casos) se encuentra en el sector oriental de Monterrey, incluido Guadalupe y Juárez, indicando actividad de la enfermedad en barrios urbanos periféricos.
- El conglomerado 3 (4 casos), el más pequeño, se localiza en la zona suburbana sur de Monterrey, lo cual sugiere transmisión localizada.

La presencia de conglomerados sugiere que la transmisión de la enfermedad se localiza, particularmente en la zona metropolitana, donde factores como la alta densidad poblacional, la interacción humano-mascota en contextos marginados y la presencia de perros callejeros pueden contribuir. Se debe mencionar que más del 50% de los casos ocurrieron en municipios donde los pacientes reportaron contacto con animales callejeros.

En cambio, los casos fuera de los conglomerados sugieren que, aunque surgen casos esporádicos en distintos municipios, el riesgo no se distribuye de manera homogénea. La mayoría de los municipios

rurales y no metropolitanos registraron únicamente casos aislados, lo que refuerza que la enfermedad permanece concentrada en zonas urbanas.

Discusión

En el norte de México, la rickettsiosis por *Rickettsia rickettsii* es endémica y representa un importante problema de salud pública debido a sus altas tasas de morbilidad y mortalidad. En Nuevo León, se han descrito brotes con tasas de letalidad que alcanzan el 67%.¹³

La serie temporal de casos de rickettsiosis en Nuevo León de 2013 a 2024 muestra un patrón fluctuante. Entre 2013 y 2021, el número de casos se mantuvo relativamente bajo, con picos más bajos en 2015 y 2018, seguido de una tendencia descendente hasta 2021. No obstante, en 2022 se observó un aumento significativo, con un pico en 2023, lo cual sugiere un brote o un incremento en la vigilancia.¹³ En

2024, aunque los casos disminuyeron comparado con 2023, se mantuvieron más altos que en la mayoría de los años previos.

Para mitigar las infecciones por rickettsias, hace falta una estrategia integral que aborde no solo el control de garrapatas como vectores, sino también limite la interacción cercana entre humanos y perros, ya sean domésticos o callejeros.

En la actualidad, se está implementando la guía de práctica clínica 2023 para la prevención, diagnóstico y tratamiento de la fiebre manchada de las Montañas Rocosas causada por *R. rickettsii* en los niveles de atención primaria y secundaria. La guía también fomenta la implementación de medidas de protección personal, el uso de repelentes comerciales que contienen piretroides, citronela o N,N-diethyl-meta-toluamida, la incorporación de prácticas de higiene rutinarias en cánidos para prevenir infestaciones por garrapatas, y el empleo de herramientas diagnósticas como la inmunofluorescencia indirecta y la reacción en cadena de la polimerasa para confirmar casos sospechosos, particularmente en áreas de alto riesgo.¹⁴

Los veterinarios desempeñan un papel fundamental en la vigilancia y el control de infecciones zoonóticas como la rickettsiosis. El uso de collares que contienen imidacloprid al 10% y flumetrina al 4.5% constituye una medida preventiva altamente eficaz, garantizando la protección de los caninos frente a infestaciones por garrapatas. La función de estos collares es proporcionar protección prolongada al repeler y eliminar garrapatas por contacto. Se recomienda encarecidamente que su uso se integre en una estrategia integral de control de garrapatas en zonas endémicas.¹⁵

La dinámica de transmisión de la rickettsiosis está íntimamente ligada a factores ambientales. Este estudio identificó una asociación significativa entre la temperatura mínima, la precipitación y la incidencia de rickettsiosis, lo que refuerza la hipótesis de que el cambio climático influye en la epidemiología de la enfermedad.

Se utilizaron diagramas de dispersión con análisis de regresión para evaluar estas relaciones. La figura 3A muestra que la temperatura mínima presenta una tendencia positiva con los casos de rickettsiosis, lo cual sugiere que temperaturas mínimas más altas favorecen la transmisión. Las garrapatas son organismos poiquiloterms y dependen de la temperatura ambiental para su actividad biológica.^{16,17} Los inviernos más cálidos pueden prolongar la actividad del vector, aumentando el riesgo de transmisión.

La regresión de Poisson confirmó esta asociación, destacando el papel de la temperatura mínima en la dinámica de transmisión.

La temperatura máxima también mostró una correlación positiva con la incidencia de rickettsiosis. La figura 3B indica que, por cada incremento de 1 °C en la temperatura máxima, la incidencia aumenta significativamente. Las temperaturas más altas pueden acelerar la deshidratación de las garrapatas, incrementando su comportamiento de búsqueda de hospedador antes de morir, en lugar de favorecer su supervivencia. Estos hallazgos cuestionan la hipótesis de que el calor extremo suprime la actividad de las garrapatas y resaltan la complejidad de la interacción entre temperatura y transmisión de enfermedades.

La precipitación mostró una asociación negativa con la incidencia de rickettsiosis, lo cual indica que los años con mayores precipitaciones registraron menos casos. Estudios ya publicados sugieren que los periodos secos favorecen la proliferación de garrapatas (por ejemplo, condiciones cálidas y secas), reducen su supervivencia al acelerar la deshidratación (Figura 1), pero al tiempo que incrementan la urgencia y frecuencia de la búsqueda de hospedador, particularmente en especies como *I. scapularis*, que pierden agua rápidamente bajo estas condiciones.^{18,19} La regresión de Poisson confirmó esta relación, indicando que por cada milímetro adicional de precipitación, la incidencia disminuye ligeramente.

Estos hallazgos subrayan la importancia del clima en la epidemiología de la rickettsiosis. A medida que van aumentando las temperaturas mínimas y cambian los patrones de precipitación, la distribución y actividad del vector pueden modificarse, incrementando el riesgo de transmisión. Además, los efectos progresivos del cambio climático podrían estar contribuyendo al aumento de casos descritos durante los últimos años.

El análisis geoespacial reveló un agrupamiento no aleatorio de los casos de rickettsiosis en Nuevo León, particularmente en el área metropolitana de Monterrey, donde se identificaron cuatro conglomerados principales. Estos hallazgos enfatizan la necesidad de intervenciones dirigidas en conglomerados de alto riesgo, incluyendo vigilancia epidemiológica intensificada, sistemas de alerta temprana basados en datos climáticos, programas de control vectorial y manejo de la población de perros callejeros. La distribución heterogénea de los casos sugiere que, aunque pueden surgir casos esporádicos en diversos municipios,

la carga de la enfermedad permanece concentrada en la región metropolitana.¹³

La aparición de casos aislados fuera de los conglomerados puede indicar una expansión geográfica gradual de la rickettsiosis, influida por la movilidad de vectores y hospedadores. Esto resalta el papel de la epidemiología espacial en la vigilancia de la propagación de la enfermedad y el diseño de estrategias de vigilancia. Estudios futuros podrían mejorar el análisis geoespacial incorporando variables ambientales como altitud, humedad y densidad poblacional para esclarecer los determinantes ecológicos de la transmisión de la rickettsiosis en la región.

Conclusiones

Mediante el uso de modelos de regresión de Poisson, hallamos que temperaturas mínimas más altas están íntimamente relacionadas con un aumento en los casos de rickettsiosis, probablemente debido a una mayor actividad del vector y a una intensificación de la transmisión del patógeno. Asimismo, temperaturas máximas más elevadas también se asociaron a un incremento en la incidencia de la enfermedad, lo cual desafía la suposición de que el calor extremo limita la actividad vectorial. En cambio, las temperaturas altas podrían favorecer la supervivencia de las garrapatas, aumentar la exposición humana a hábitats vectoriales o acelerar la replicación de *Rickettsia*. En cambio, mayores niveles de precipitación se correlacionaron con una menor incidencia de la enfermedad, posiblemente debido a modificaciones ambientales que alteran la interacción garrapata-hospedador o reducen las poblaciones vectoriales.

Estos hallazgos ponen de manifiesto la necesidad urgente de llevar a cabo estrategias integradas de vigilancia y control basadas en el clima. Una comprensión más completa de cómo las condiciones climáticas moldean la dinámica de las enfermedades podría mejorar los sistemas de alerta temprana, optimizar los programas de control vectorial e informar intervenciones de salud pública dirigidas. Investigaciones futuras deberían incorporar datos temporales de alta resolución y considerar variables ecológicas y socioeconómicas adicionales, como la urbanización, la fragmentación del hábitat y las interacciones humano-vector, para perfeccionar los modelos predictivos de transmisión de la rickettsiosis en el contexto del cambio climático.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del Departamento de Infectología Pediátrica del Hospital Universitario “Dr. José Eleuterio González” de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Los autores extienden su gratitud a sus mentores de investigación, Dr. J.I. Castillo Bejarano y Dr. A. Homero Mascareña-de los Santos. Asimismo, agradecen a los médicos internos que realizan su servicio social, V. Berumen Millán y A.S. Guerrero Delgado.

Financiamiento

En cumplimiento de los principios de transparencia e integridad, los autores declaran que esta investigación no ha recibido financiamiento, patrocinio ni apoyo económico de ninguna entidad pública o privada que pudiera influir en su contenido, resultados o conclusiones.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflicto de intereses que puedan comprometer la objetividad e independencia de este proyecto. Los autores no tienen relaciones personales, comerciales o financieras con entidades que puedan beneficiarse directa o indirectamente de los resultados presentados en este documento.

Consideraciones éticas

Protección de personas y animales. Los autores declaran que para esta investigación no se han realizado experimentos en seres humanos ni en animales.

Confidencialidad, consentimiento informado y aprobación ética. Los autores han seguido los protocolos de su centro sanitario/institución para acceder a los datos de las historias clínicas. Se ha obtenido el consentimiento informado de los pacientes y se cuenta con la aprobación del Comité de Ética. Se han seguido las recomendaciones de las guías SAGER.

Declaración sobre el uso de inteligencia artificial (IA). Los autores declaran que no se utilizó ningún tipo de inteligencia artificial generativa para la redacción ni la creación de contenido de este manuscrito.

Referencias

1. World Health Organization. Vector-Borne Diseases. Disponible en: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/vector-borne-diseases> [consultado 2025 Mar 02].
2. Caminade C, McIntyre KM, Jones AE. Impact of recent and future climate change on vector-borne diseases. *Ann N Y Acad Sci.* 2019;1436: 157-73.

3. Ryan SJ, Carlson CJ, Mordecai EA, Johnson LR. Global expansion and redistribution of aedes-borne virus transmission risk with climate change. *PLoS Negl Trop Dis*. 2019;13:e0007213.
4. Voyiatzaki C, Papailia SI, Venetikou MS, Pouris J, Tsoumani ME, Papa-georgiou EG. Climate changes exacerbate the spread of *Ixodes ricinus* and the occurrence of Lyme borreliosis and tick-borne encephalitis in Europe-how climate models are used as a risk assessment approach for tick-borne diseases. *Int J Environ Res Public Health*. 2022;19:6516.
5. Allen M, De Coninck H, Dube OP, Ebi KL, Engelbrecht F, Ferrat M, et al. Technical Summary: Global Warming of 1.5 C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5 C Above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat; 2018. Disponible en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2018/12/sr15_ts_high_res.pdf
6. World Meteorological Organization. WMO Recognizes New Arctic Temperature Record of 38°C; 2021. Disponible en: <https://wmo.int/media/news/wmo-recognizes-new-arctic-temperature-record-of-380c> [consultado 2025 Mar 19].
7. Černý J, Elsterová J, Culler L. Melting, melting pot - climate change and its impact on ticks and tick-borne pathogens in the arctic. In: *Climate, Ticks and disease*. Wallingford: CABI; 2021. p. 460-8.
8. Myhre G, Shindell D, Pongratz J. Anthropogenic and natural radiative forcing. In: *Intergovernmental Panel on Climate Change, editor. Climate Change 2013 - The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press; 2014. p. 659-740.
9. Gilbert L. The impacts of climate change on ticks and tick-borne disease risk. *Annu Rev Entomol*. 2021;66:373-88.
10. Apanaskevich DA, Oliver JH. Life cycles and natural history of ticks. In: *Sonenshine DE, Roe RM, editors. Biology of Ticks*. 2nd ed. New York: Oxford University Press; 2014. p. 59-73.
11. Nuttall PA. Climate change impacts on ticks and tick-borne infections. *Biol (Bratisl)*. 2022;77:1503-12.
12. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Mapas de Clima de Nuevo León; 2013. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/pais/anuario_multi/2013/nl/mapas_19.pdf [consultado 2025 Mar 18].
13. Estrada-Mendizabal RJ, Tamez-Rivera O, Vela EH, Blanco-Murillo P, Alanis-Garza C, Flores-Gouyonnet J, et al. Rickettsial disease outbreak, Mexico, 2022. *Emerg Infect Dis*. 2023;29:1944-7.
14. Caamal-Itzá A, Santos CA, Ramón-García LE, Gutiérrez-Cedillo V, Danis-Lozano R, Puerto-Manzano FI, et al. Previniendo las rickettsiosis en México: importancia del material de promoción de la salud. *Salud Publica Mex*. 2025;67:190-7.
15. Álvarez G. Prevención, Diagnóstico y Tratamiento de la Fiebre Manchada; 2023. Disponible en: <https://www.cenotec-difusion.com/cmGPC/ss-595-23/er.pdf>
16. Fieler AM, Rosendale AJ, Farrow DW, Dunlevy MD, Davies B, Oyen K, et al. Larval thermal characteristics of multiple ixodid ticks. *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol*. 2021;257:110939.
17. Deshpande G, Beetch JE, Heller JG, Naqvi OH, Kuhn KG. Assessing the influence of climate change and environmental factors on the top tick-borne diseases in the United States: a systematic review. *Microorganisms*. 2023;12:50.
18. Nielebeck C, Kim SH, Pepe A, Himes L, Miller Z, Zummo S, et al. Climatic stress decreases tick survival but increases rate of host-seeking behavior. *Ecosphere*. 2023;14:e4369.
19. Cohen R, Finn T, Babushkin F, Paran Y, Ben Ami R, Atamna A, et al. Spotted fever group rickettsioses in Israel, 2010-2019. *Emerg Infect Dis*. 2021;27:2117-26.