



**UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES**  
**CARRERA DE GESTIÓN AMBIENTAL**

Proyecto de Investigación previo  
a la obtención del título de  
Ingeniero en Gestión Ambiental.

**Título del Proyecto de Investigación:**

“Cambio climático y distribución geográfica potencial de vectores de enfermedades en Ecuador continental, basados en el modelo del nicho ecológico”

**Autor:**

Muñoz Palma Mario Stalin

**Director:**

Blgo. Juan Pablo Urdanigo Zambrano, MSc.

**Quevedo-Los Ríos-Ecuador**

**Año 2019**

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, **Muñoz Palma Mario Stalin**, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Universidad Técnica Estatal de Quevedo, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

f. \_\_\_\_\_

Muñoz Palma Mario Stalin

**Autor del Proyecto de Investigación**

## **CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

El suscrito, **Blgo. Juan Pablo Urdanigo Zambrano, MSc.**, Docente de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, certifica que el estudiante **Muñoz Palma Mario Stalin** realizó el Proyecto de Investigación de grado titulado “**Cambio climático y distribución geográfica potencial de vectores de enfermedades en Ecuador continental, basados en el modelo del nicho ecológico**”, previo a la obtención del título de Ingeniero en Gestión Ambiental, bajo mi dirección, habiendo cumplido con las disposiciones reglamentarias establecidas para el efecto.

f. \_\_\_\_\_

Blgo. Juan Pablo Urdanigo Zambrano, MSc.

**Director del Proyecto de Investigación**

# CERTIFICADO DEL REPORTE DE LA HERRAMIENTA DE PREVENCIÓN DE COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO



## Urkund Analysis Result

**Analysed Document:** Tesis, CAMBIO CLIMÁTICO.pdf (D58826632)  
**Submitted:** 13/11/2019 22:08:00  
**Submitted By:** stalin.palma.9@hotmail.com  
**Significance:** 6 %

### Sources included in the report:

TESIS FACTORES DE RIESGO QUE INFLUYEN EN LAS ENFERMEDADES VECTORIALES.docx (D55565943)  
ZapataTesis1\_18-10-2019.pdf (D57257903)  
proyecto final.docx (D25679247)  
Tesis\_Mario\_Balseca.docx (D26279187)  
Avance Proyecto de Tesis - Julio Arenas.docx (D46890227)  
proyecto final Epidemiología.docx (D25652333)  
alex\_coveña\_urkund\_tesis.docx (D43249664)  
<https://repository.usergioarboleda.edu.co/bitstream/handle/11232/825/El%20fen%C3%B3meno%20del%20ni%C3%B1o%20y%20la%20seroprevalencia%20de%20enfermedad%20de%20chagas.pdf?sequence=2&isAllowed=y>  
[https://www.paho.org/hq/index.php?option=com\\_topics&view=article&id=37&Itemid=40760&lang=es](https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_topics&view=article&id=37&Itemid=40760&lang=es)  
[https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/16\\_salud\\_humana\\_2\\_tcm30-178509.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/16_salud_humana_2_tcm30-178509.pdf)  
<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6869920.pdf>

### Instances where selected sources appear:

23



**UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES**  
**CARRERA DE GESTIÓN AMBIENTAL**

**CERTIFICADO DE APROBACIÓN POR TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

**TÍTULO DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

“Cambio climático y distribución geográfica potencial de vectores de enfermedades en Ecuador continental, basados en el modelo del nicho ecológico”

Presentado al Consejo Académico como requisito previo a la obtención del Título de Ingeniero en Gestión Ambiental.

Aprobado:

---

Betty González Osorio, PhD.  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE  
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

---

Ing. Harry Lozano Mendoza, MS.c.  
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL  
DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

---

Yarelys Ferrer Sánchez, PhD.  
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL  
DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

**Quevedo - Los Ríos - Ecuador**  
**Año 2019**

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios mi Padre Celestial por haberme otorgado la vida y las fuerzas necesarias para poder alcanzar cada una de las metas que me propuse.

A mis Queridos Padres por ese desinteresado apoyo moral, económico y emocional brindado durante esta larga trayectoria universitaria.

A los docentes de la Facultad de Ciencias Ambientales-UTEQ por la enorme paciencia y dedicación prestada durante mi formación académica, y sobre todo por el sustancial conocimiento transmitido.

A la UTEQ y la Facultad de Ciencias Ambientales por haberme abierto sus puertas y darme la oportunidad de formarme como futuro profesional capacitado.

## **DEDICATORIA**

A Dios, mi Padre celestial, creador y dador de la vida, sin cuya ayuda hubiese sido imposible cumplir mis propósitos y llegar hasta esta instancia académica.

A mis queridos y estimados padres, por constituirse en el pilar fundamental de mi vida, e inculcarme los debidos valores y principios morales con los cuales me identificó como persona.

A mi grandiosa familia, esto es, hermanos, tíos, sobrinos, primos, abuelos [...], y en definitiva a todas aquellas personas cercanas a mí que siempre estuvieron pendientes de mi bienestar, y especialmente de mi carrera profesional.

## RESUMEN EJECUTIVO

El estudio evaluó la distribución geográfica de las especies de vectores *A. aegypti*, *S. damnosus* y *T. cruzi* en escenarios de cambio climático en el Ecuador continental. Para su consecución se llevó a cabo lo siguiente: a) identificar la distribución geográfica del potencial de especies vectores en Ecuador durante el periodo 2019, b) proyectar el área de distribución potencial de invasión de las especies de vectores de enfermedades en escenarios de cambio climático. La metodología de trabajo implicó las siguientes etapas: (i) búsqueda registros de presencia de las especies en su zona nativa y de invasión, mediante base de datos Global Biodiversity Information Facility; (ii) eliminación de registros duplicados (localizados en 1 km<sup>2</sup>) en la plataforma NicheToolBox; (iii) modelación a futuro (periodo 2050-2070) de las variables con los escenarios RCP45 y RCP85; (iv) identificación de las variables más correlacionadas según coeficiente de Pearson (>0.70) y aquellas que mayor aportan al modelo mediante análisis Jackknife; (v) modelación del área de distribución de los vectores mediante algoritmo de Máxima Entropía Maxent 3.3k. Los resultados muestran lo siguiente: (i) *Aedes aegypti* evidencia una distribución geográfica actual muy amplia en las provincias de Guayas, Los Ríos y Orellana; se identificó que Guayas, Machala, Esmeraldas, Manabí y Santa Elena poseen condiciones ambientales favorables para el desarrollo de la especie; la variable bioclimática14 (precipitación del mes más seco), es la que mayor contribución otorga al modelo. (ii) *Simulium damnosus* se concentra mayoritariamente en las provincias de Carchi, Cotopaxi y Chimborazo, en la región sierra, y en los territorios amazónicos de las provincias de Napo y Morona Santiago, siendo Napo la provincia con mayor ocurrencia de la especie; el callejón interandino dispone de las condiciones ambientales adecuadas para el desarrollo de la especie, es por ello que las variables bioclimáticas bio9 (temperatura promedio del trimestre más seco) y bio17 (precipitación en el trimestre más seco) mostraron una importante contribución al modelo realizado. (iii) *Tripanosoma cruzi* (chinche de triatoma) se concentra en las provincias de Los Ríos y Guayas, esta última con mayor grado de presencia, sobre todo en la zona costera cercana al Golfo de Guayaquil, en el que coexisten las condiciones ambientales óptimas para el desarrollo de la especie.

**Palabras claves:** cambio climático, escenario climático, vector de enfermedades, especie nativa, especie invasiva.

## ABSTRACT

The study evaluated the geographic distribution of the vector species *A. aegypti*, *S. damnosus* and *T. cruzi* in climate change scenarios in continental Ecuador. To achieve this, the following was carried out: a) identify the geographic distribution of potential vector species in Ecuador during the 2019 period, b) project the potential distribution area of invasion of disease vector species in climate change scenarios. The work methodology involved the following stages: (i) search for records of the presence of species in their native and invasion zones, using the Global Biodiversity Information Facility database; (ii) elimination of duplicate records (located in 1 km<sup>2</sup>) in the NicheToolBox platform; (iii) future modeling (period 2050-2070) of the variables with the RCP45 and RCP85 scenarios; (iv) identification of the most correlated variables according to Pearson's coefficient ( $>0.70$ ) and those that contribute the most to the model by means of Jackknife analysis; (v) modeling of the distribution area of the vectors by means of Maxent 3.3k Maximum Entropy algorithm. The results show the following: (i) *Aedes aegypti* evidences a wide geographic distribution in the provinces of Guayas, Los Ríos and Orellana; it was identified that Guayas, Machala, Esmeraldas, Manabí and Santa Elena have favorable environmental conditions for the development of the species; the bioclimatic variable14 (precipitation of the driest month), is the one that most contributed to the model. (ii) *Simulium damnosus* is concentrated mainly in the provinces of Carchi, Cotopaxi and Chimborazo, in the sierra region, and in the Amazonian territories of the provinces of Napo and Morona Santiago, with Napo being the province with the highest occurrence of the species; the inter-Andean alley has the appropriate environmental conditions for the development of the species, which is why the bioclimatic variables bio9 (average temperature of the driest quarter) and bio17 (precipitation in the driest quarter) showed an important contribution to the model made. (iii) *Trypanosoma cruzi* (triatoma bedbug) is concentrated in the provinces of Los Ríos and Guayas, the latter with a greater degree of presence, especially in the coastal zone near the Gulf of Guayaquil, where the optimal environmental conditions for the development of the species coexist.

**Keywords:** climate change, climate scenario, disease vector, native species, invasive species.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

|   |      |
|---|------|
| PORTADA .....   | i    |
| DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS .....   | ii   |
| CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.....                                       | iii  |
| CERTIFICADO DEL REPORTE DE LA HERRAMIENTA DE PREVENCIÓN DE<br>COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO ..... | iv   |
| CERTIFICADO DE APROBACIÓN POR TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN .....  | v    |
| AGRADECIMIENTO .....  | vi   |
| DEDICATORIA.....  | vii  |
| RESUMEN EJECUTIVO .....   | viii |
| ABSTRACT .....  | ix   |
| ÍNDICE DE CONTENIDO .....   | x    |
| ÍNDICE DE TABLAS.....   | xiv  |
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....   | xv   |
| CÓDIGO DUBLIN .....   | xvi  |
| INTRODUCCIÓN.....   | 1    |
| CAPÍTULO I. CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....  | 3    |
| 1.1 Problema de la investigación .....  | 4    |
| 1.1.1 Planteamiento del problema .....  | 4    |
| 1.1.1.1 Diagnóstico.....  | 4    |
| 1.1.1.2 Pronóstico.....   | 5    |
| 1.1.2 Formulación del problema.....   | 5    |
| 1.1.3 Sistematización del problema.....   | 6    |
| 1.2 Objetivos.....  | 6    |
| 1.2.1 Objetivo general .....  | 6    |
| 1.2.2 Objetivos específicos .....   | 6    |
| 1.3 Justificación .....   | 6    |

|   |    |
|---|----|
| CAPÍTULO II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN.....                                | 8  |
| 2.1 Marco conceptual.....   | 9  |
| 2.1.1 Cambio climático.....   | 9  |
| 2.1.1.1 Escenarios de cambio climático .....  | 9  |
| 2.1.2 Variable climática.....   | 10 |
| 2.1.3 Vector .....  | 10 |
| 2.1.4 Enfermedades transmitidas por vectores .....  | 11 |
| 2.1.4.1 Insecto .....   | 11 |
| 2.1.4.2 Parásito .....  | 12 |
| 2.1.5 <i>Aedes aegypti</i> .....  | 12 |
| 2.1.6 <i>Simulium damnosus</i> .....  | 12 |
| 2.1.7 <i>Tripanosoma cruzi</i> .....  | 12 |
| 2.1.8 Puntos de presencia .....   | 13 |
| 2.1.9 Sistemas de Información Geográfica.....   | 14 |
| 2.1.10 Nicho ecológico.....   | 15 |
| 2.1.11 Algoritmo de Maxent .....  | 15 |
| 2.1.12 Modelos de distribución de especies .....  | 16 |
| 2.1.13 NicheToolbox .....   | 16 |
| 2.1.14 Global Biodiversity Information Facility (GBIF) .....                                | 17 |
| 2.1.15 World Clim 1.4.....  | 18 |
| 2.2 Marco teórico.....  | 19 |
| 2.2.1 Factores que causan el cambio climático .....   | 19 |
| 2.2.2 Cambio climático y distribución espacial de especies.....                             | 21 |
| 2.2.3 Efectos del cambio climático sobre las enfermedades transmitidas por<br>vectores..... | 23 |
| 2.2.4 Modelos de nicho ecológico .....  | 25 |
| 2.3 Marco referencial.....  | 29 |

|   |   |    |
|---|---|----|
| 2.3.1   | Predicción de posibles rangos de vectores primarios de malaria y malaria en el norte de América del Sur en función de los cambios proyectados en el clima, la cobertura del suelo y la población humana (2015).....                                   | 29 |
| 2.3.2   | Cambios geográficos en la idoneidad del hábitat de <i>Aedes aegypti</i> en Ecuador utilizando datos de vigilancia de larvas y modelos de nicho ecológico: implicaciones del cambio climático para el control de vectores de salud pública (2019)..... | 29 |
| 2.3.3   | Disminución de la prevalencia de vectores de enfermedades bajo el cambio climático (2016).....  | 30 |
| 2.3.4   | Predicción de la distribución del vector de la malaria en escenarios de cambio climático en China: Desafíos para la eliminación del paludismo.....  | 31 |
| 2.3.5   | Expansión global y redistribución del riesgo de transmisión del virus transmitido por <i>Aedes</i> con el cambio climático. ....  | 31 |
| 2.3.6   | Impacto potencial del cambio climático en la distribución geográfica de dos vectores silvestres de la enfermedad de Chagas en Chile: <i>Mepraia spinolai</i> y <i>Mepraia gajardoi</i> .....  | 32 |
| 2.3.7   | Los efectos del cambio climático mundial en la vulnerabilidad de Venezuela a la enfermedad de Chagas están relacionados con la distribución geográfica de cinco especies de triatomíneos.....   | 33 |
| CAPÍTULO III. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN ..... |   | 34 |
| 3.1   | Localización.....   | 35 |
| 3.2   | Tipo de investigación.....  | 36 |
| 3.2.1   | Exploratoria .....  | 36 |
| 3.3   | Métodos de investigación .....  | 36 |
| 3.3.1   | Analítico .....   | 36 |
| 3.4   | Fuentes de recopilación de información .....  | 36 |
| 3.4.1   | Primarias.....  | 36 |
| 3.4.2   | Secundarias.....  | 36 |
| 3.5   | Diseño de la investigación .....  | 37 |
| 3.5.1   | Selección de especies vectores de enfermedades .....  | 37 |

|  |  |    |
|--|--|----|
| 3.5.2  | Obtención de Variables bioclimáticas de World Clim 1.4 para el Ecuador continental .....                                       | 38 |
| 3.5.3  | Modelación de nicho ecológico .....  | 39 |
| 3.6  | Recursos humanos y materiales .....  | 41 |
| CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....        |  | 42 |
| 4.1  | Resultados .....   | 43 |
| 4.1.1  | Distribución geográfica del potencial de especies vectores en Ecuador durante el periodo 2019. ....                            | 43 |
| 4.1.1.1  | <i>Aedes aegypti</i> .....   | 43 |
| 4.1.1.2  | <i>Simulium damnosus</i> .....   | 46 |
| 4.1.1.3  | <i>Tripanosoma cruzi</i> .....   | 49 |
| 4.1.2  | Área de distribución potencial de invasión de las especies de vectores de enfermedades en escenarios de cambio climático. .... | 52 |
| 4.1.2.1  | <i>Aedes aegypti</i> .....   | 52 |
| 4.1.2.2  | <i>Simulium damnosus</i> .....   | 53 |
| 4.1.2.3  | <i>Tripanosoma cruzi</i> .....   | 54 |
| 4.2  | Discusión .....  | 55 |
| CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES ..... |  | 58 |
| 5.1  | Conclusiones .....   | 59 |
| 5.2  | Recomendaciones .....  | 59 |
| CAPÍTULO VI. BIBLIOGRAFÍA .....                  |  | 61 |
| 6.1  | Referencias bibliográficas.....  | 62 |
| CAPÍTULO VII. ANEXOS.....                        |  | 73 |
| 7.1  | Anexos de la investigación .....   | 74 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Lista de especie potencialmente invasoras .....                    | 37 |
| Tabla 2. Variables bioclimáticas de WorldClim 1.4. ....                     | 38 |
| Tabla 3. Recursos humanos y materiales utilizados en la investigación. .... | 41 |

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

|  |    |
|--|----|
| Ilustración 1. Mapa de localización geográfica del Ecuador continental.....  | 35 |
| Ilustración 2. Registro de presencia de <i>Aedes aegypti</i> en Ecuador continental.....   | 43 |
| Ilustración 3. Escenario actual de distribución geográfica de <i>Aedes aegypti</i> .....   | 44 |
| Ilustración 4. Prueba de jackknife para las variables bioclimáticas utilizadas en el modelo actual de distribución geográfica de <i>Aedes aegypti</i> .....        | 45 |
| Ilustración 5. Registro de presencia de <i>Simulium damnosus</i> en Ecuador continental.....   | 46 |
| Ilustración 6. Escenario actual de distribución geográfica de <i>Simulium damnosus</i> .....   | 47 |
| Ilustración 7. Prueba de jackknife para las variables bioclimáticas utilizadas en el modelo actual de distribución geográfica de <i>Simulium damnosus</i> .....    | 48 |
| Ilustración 8. Registro de presencia de <i>Tripanosoma cruzi</i> en Ecuador continental.....   | 49 |
| Ilustración 9. Escenario actual de distribución geográfica de <i>Tripanosoma cruzi</i> .....   | 50 |
| Ilustración 10. Prueba de jackknife para las variables bioclimáticas utilizadas en el modelo actual de distribución geográfica de <i>Tripanosoma cruzi</i> .....   | 51 |
| Ilustración 11. Distribución geográfica potencial de <i>Aedes aegypti</i> bajo escenarios de cambio climático 2050 (RCP45 y RCP85) y 2070 (RCP45 y RCP85).....     | 52 |
| Ilustración 12. Distribución geográfica potencial de <i>Simulium damnosus</i> bajo escenarios de cambio climático 2050 (RCP45 y RCP85) y 2070 (RCP45 y RCP85)..... | 53 |
| Ilustración 13. Distribución geográfica potencial de <i>Tripanosoma cruzi</i> bajo escenarios de cambio climático 2050 (RCP45 y RCP85) y 2070 (RCP45 y RCP85)..... | 54 |

## CÓDIGO DUBLIN

|                             |  |                     |                        |
|-----------------------------|--|---------------------|------------------------|
| <b>Título</b>               | Cambio climático y distribución geográfica potencial de vectores de enfermedades en Ecuador continental, basados en el modelo del nicho ecológico.   |                     |                        |
| <b>Autor</b>                | Muñoz Palma Mario Stalin   |                     |                        |
| <b>Palabras clave</b>       | Cambio climático   | Escenario climático | Vector de enfermedades |
|                             | Especie nativa   | Especie invasora    |                        |
| <b>Fecha de publicación</b> | Diciembre, 2019  |                     |                        |
| <b>Editorial</b>            | FACCAMB-UTEQ   |                     |                        |
| <b>Resumen</b>              | <p>El estudio evaluó la distribución geográfica de las especies de vectores <i>A. aegypti</i>, <i>S. damnosus</i> y <i>T. cruzi</i> en escenarios de cambio climático en el Ecuador continental. Para su consecución se llevó a cabo lo siguiente: a) identificar la distribución geográfica del potencial de especies vectores en Ecuador durante el periodo 2019, b) proyectar el área de distribución potencial de invasión de las especies de vectores de enfermedades en escenarios de cambio climático. La metodología de trabajo implicó las siguientes etapas: (i) búsqueda registros de presencia de las especies en su zona nativa y de invasión, mediante base de datos Global Biodiversity Information Facility; (ii) eliminación de registros duplicados (localizados en 1 km<sup>2</sup>) en la plataforma NicheToolBox; (iii) modelación a futuro (periodo 2050-2070) de las variables con los escenarios RCP45 y RCP85; (iv) identificación de las variables más correlacionadas según coeficiente de Pearson (&gt;0.70) y aquellas que mayor aportan al modelo mediante análisis Jackknife; (v) modelación del área de distribución de los vectores mediante algoritmo de Máxima Entropía Maxent 3.3k. Los resultados muestran lo siguiente: (i) <i>Aedes aegypti</i> evidencia una distribución geográfica actual muy amplia en las provincias de Guayas, Los Ríos y Orellana; se identificó que Guayas, Machala, Esmeraldas, Manabí y Santa Elena poseen condiciones ambientales favorables para el desarrollo de la especie; la variable bioclimática14 (precipitación del mes más seco), es la que mayor contribución otorgo al modelo. (ii) <i>Simulium damnosus</i> se concentra mayoritariamente en las provincias de Carchi, Cotopaxi y Chimborazo, en la región sierra, y en los territorios amazónicos de las provincias de Napo y Morona Santiago, siendo Napo la provincia con mayor ocurrencia de la especie; el callejón interandino dispone de las condiciones ambientales adecuadas para el desarrollo de la especie, es por ello que las variables bioclimáticas bio9 (temperatura promedio del trimestre más seco) y bio17 (precipitación en el trimestre más seco) mostraron una importante contribución al modelo realizado. (iii) <i>Trypanosoma cruzi</i> (chinche de triatoma) se concentra en las provincias de Los Ríos y Guayas, esta última con mayor grado de presencia, sobre todo en la zona costera cercana al Golfo de Guayaquil, en el que coexisten las condiciones ambientales óptimas para el desarrollo de la especie.</p> <p><b>Palabras claves:</b> cambio climático, escenario climático, vector de enfermedades, especie nativa, especie invasiva.</p> |                     |                        |
| <b>Abstract</b>             | <p>The study evaluated the geographic distribution of the vector species <i>A. aegypti</i>, <i>S. damnosus</i> and <i>T. cruzi</i> in climate change scenarios in continental Ecuador. To achieve this, the following was carried out: a) identify the geographic distribution of potential vector species in Ecuador during the 2019 period, b) project the potential distribution area of invasion of disease vector species in climate change scenarios. The work methodology involved the following stages: (i) search for records of the presence of species in their native and invasion zones, using the Global Biodiversity Information Facility database; (ii) elimination of duplicate records (located in 1 km<sup>2</sup>) in the NicheToolBox platform; (iii) future modeling (period 2050-2070) of the variables with the RCP45 and RCP85 scenarios; (iv) identification of the most correlated variables according to Pearson's coefficient (&gt;0.70) and those that contribute the most to the model by means of Jackknife analysis; (v) modeling of the distribution area of the vectors by means of Maxent 3.3k Maximum Entropy algorithm. The results show the following: (i) <i>Aedes aegypti</i> evidences a wide geographic distribution in the provinces of Guayas, Los Ríos and Orellana; it was identified that Guayas, Machala, Esmeraldas, Manabí and Santa Elena have favorable environmental conditions for the development of the species; the bioclimatic variable14 (precipitation of the driest month), is the one that most contributed to the model. (ii) <i>Simulium damnosus</i> is concentrated mainly in the provinces of Carchi, Cotopaxi and Chimborazo, in the sierra region, and in the Amazonian territories of the provinces of Napo and Morona Santiago, with Napo being the province with the highest occurrence of the species; the inter-Andean alley has the appropriate environmental conditions for the development of the species, which is why the bioclimatic variables bio9 (average temperature of the driest quarter) and bio17 (precipitation in the driest quarter) showed an important contribution to the model made. (iii) <i>Trypanosoma cruzi</i> (triatoma bedbug) is concentrated in the provinces of Los Ríos and Guayas, the latter with a greater degree of presence, especially in the coastal zone near the Gulf of Guayaquil, where the optimal environmental conditions for the development of the species coexist.</p> <p><b>Keywords:</b> climate change, climate scenario, disease vector, native species, invasive species.</p>   |                     |                        |

## INTRODUCCIÓN

Los efectos del cambio climático sobre la biodiversidad son inminentes, se han documentado modificaciones en los periodos de migración, reproducción, alteración en las interacciones biológicas, así como cambios en las distribuciones originales de las especies. Estas modificaciones se han reportado para poblaciones o especies individuales, sin embargo, las respuestas de las comunidades y el funcionamiento de los ecosistemas ante estos cambios permanecen inciertas (1). El cambio climático ha favorecido en el aumento de la fenología de los insectos, vectores de enfermedades, que alarga su periodo de actividad en condiciones favorables y alarga la diapausa (letargo) en condiciones adversas, de forma que la temperatura es un factor crítico para la densidad vectorial y su capacidad de transmisión, la cual da un aumento a la tasa de inoculación (2).

En el último siglo hubo un incremento de  $0.6^{\circ}\text{C}$  en la temperatura promedio de la superficie terrestre (3), fenómeno que se mantendrá si la actividad humana persiste al ritmo actual. A respecto, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambios Climáticos (IPCC, por sus siglas en inglés) indica en su último informe titulado “Calentamiento global de  $1,5^{\circ}\text{C}$  (2018)”, que la temperatura media mundial se elevará varios grados celsius durante este siglo y que para el 2100 la temperatura mundial habrá aumentado como promedio  $1,0\text{--}3,5^{\circ}\text{C}$  (4). Esta estimación genera una incertidumbre inevitable sobre el futuro desarrollo de la humanidad (5), con lo que aumentara también el riesgo de enfermedades transmitidas por vectores en nuevas zonas. El mayor efecto del cambio climático en ese sentido se observará probablemente en los extremos del intervalo de temperaturas requerido para la transmisión (para muchas enfermedades,  $14\text{--}18^{\circ}\text{C}$  como límite inferior, y  $35\text{--}40^{\circ}\text{C}$  como límite superior) (6).

En ese contexto, se estima que el mayor efecto en la salud por el cambio climático se verá reflejado en las enfermedades transmitidas por vectores (ETV) (5). Las ETV son todas aquellas enfermedades que se transmiten por medio de un hospedero intermedio llamado vector, el cual usualmente es un insecto. El informe de la Organización Mundial de la Salud (OMS) de 2014, reconoce que las ETV representan más de 17% de todas las enfermedades infecciosas y provocan cada año más de 1 millón de defunciones alrededor del mundo (7).

Actualmente se han utilizado diversos modelos matemáticos para facilitar la comprensión de las complejas interacciones entre las poblaciones de vectores y sus hospederos) (5). Los modelos predictivos son una herramienta importante en una variedad de aplicaciones en

ecología y conservación y de cambio climático (8). En relación a esto, los Sistemas de Información Geográfica, permiten integrar variables ecológicas asociadas a las especies y así entender las variables que permiten predecir su distribución (9).

Otros modelos, de reciente uso, son los de la matriz de la próxima generación, los cuales han resultado ser una sencilla forma de evaluar la sensibilidad y riesgo, de una población. En este sentido, el enfoque es obtener simulaciones a partir del número de casos de individuos infectados en una población totalmente susceptible ( $R_0$ ), posteriormente se puede determinar la tendencia lineal a partir de parámetros extraídos de la literatura, ya sean antecedentes, actuales o predicciones (10). Tales modelos han sido epidemiológicamente útiles para determinar la tasa y persistencia de infección, así como el éxito que pueden tener algunos vectores para invadir y/o propagarse (5).

En Suramérica las principales enfermedades de transmisión vectorial sensibles al clima son la leishmaniasis, la enfermedad de Chagas, la esquistosomiasis, y el dengue, este último es la más extendida y grave de las enfermedades de transmisión vectorial sensibles al clima (11). En Ecuador el cambio climático tras dos años de estudiarse los límites de tolerancia de esas especies en diferentes regiones, a lo largo de la historia respecto a temperatura y precipitación, determinaron que las zonas bajas ya no tendrían condiciones ambientales para la reproducción de los vectores. Cambiando su distribución y aproximándose más hacia la sierra, pero con una ocupación más restringida (12).

En virtud de las modificaciones evidenciadas en el comportamiento y distribución geográfica de algunas especies de vectores transmisores de enfermedades tropicales, se planteó la investigación en mención, misma que tuvo como fin evaluar la distribución geográfica potencial de tres especies exóticas de vectores de enfermedades: *Aedes aegypti*, *Simulium damnosus* y *Tripanosoma cruzi*, en diferentes escenarios de cambio climático en el Ecuador continental. Para ello se recurrió a la identificación de las características ambientales en el área de distribución nativa y de invasión, determinación del área de distribución potencial de invasión y la proyección del área de distribución potencial de invasión de las especies de vectores.

## **CAPÍTULO I. CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

## **1.1 Problema de la investigación**

### **1.1.1 Planteamiento del problema**

Los efectos que se han venido dando a causa de los vectores en el plano económico, social y en la salud, ha hecho que las entidades como la OMS y los sectores gubernamentales ofrezcan orientaciones estratégicas a los países y a las organizaciones no gubernamentales para el desarrollo con respecto al fortalecimiento del control de los vectores como planteamiento fundamental para prevenir enfermedades y responder ante los brotes. El cambio climático influye en los determinantes sociales y medioambientales de la salud, muchas de las enfermedades más mortíferas, como las diarreas, la malnutrición, la malaria y el dengue, son muy sensibles al clima y es de prever que se agravarán con el cambio climático (13). No obstante, a pesar de los múltiples problemas en la distribución potencial de vectores transmisores de enfermedades, los centros de salud pública no cuentan con información suficiente de la distribución potencial de los vectores para dar respuesta a los posibles problemas derivados con su presencia (14).

#### **1.1.1.1 Diagnóstico**

Alrededor del 70% del territorio continental del Ecuador posee condiciones ambientales y localización geográfica propicias para la reproducción de *Aedes aegypti*, entre ellas: latitud (35° N -35° S), altitud (>1000 msnm en la Costa y Amazonía, >2000 msnm en la Sierra) (14), temperatura (15-40 °C), humedad relativa (moderada a alta), precipitación (moderada a alta), fenómenos ocasionales (El Niño). También existen factores socio-económicos que favorecen la propagación del vector, tales como: carencia de infraestructura sanitaria, movimientos migratorios, viviendas precarias, desechos sólidos y recipientes inútiles con agua (usados como hábitat) (15). Entre el periodo 2010-2014 se reportaron 1138 casos de malaria y 72.060 casos de dengue, este último con carácter hiperendémico en la región costera de tierras bajas, donde se presentan nuevos casos cada año, con transmisión máxima durante la temporada de lluvias (febrero a mayo) y transmisión esporádica el resto del año. Mientras que en el año 2015 se informaron 33.000 casos de chikungunya (16).

En América, los casos de oncocercosis (ceguera de los ríos) producidos por *Simulium damnosus* se encuentran distribuidos en Guatemala, Venezuela, Brasil, Ecuador, Colombia y México; en ellos, la enfermedad está contenida en 13 focos donde hay 1.950 comunidades. En el caso de Ecuador, el foco se extiende hasta Esmeraldas-Pichincha con 99 comunidades,

de las cuales 42 son de tipo hiperendémicas. Asimismo, se evidencian seis focos pequeños, catalogados satélites, que comprenden 20 comunidades. En las zonas afectadas por oncocercosis en Ecuador residen 23.386 personas (17), cuyas infecciones se caracterizan por lesiones oculares y de piel, y muchas otras complicaciones (18).

Para la erradicación de la enfermedad el país ha adoptado como estrategia de control y eliminación, la administración masiva y semestral de ivermectina (Mectizan®), en toda el área endémica (19).

En Ecuador, las infecciones por *Tripanosoma cruzi* en humanos se han observado en diferentes provincias desde 1930 (20). El parásito circula en dos ciclos en gran medida independientes: uno correspondiente al ambiente selvático y otro relacionado con el ambiente doméstico / peridoméstico. Además, nuestros datos indican que la actividad humana podría promover la dispersión de parásitos entre las comunidades (21). La vía de transmisión oral del parásito se da por el consumo de carne de animales silvestres (22).

Se ha reportado una seroprevalencia nacional de infección por *T. cruzi* de 1.38%, correspondiente a 165-170,000 pacientes seropositivos en el país. Se priorizaron tres regiones: la región costera (seroprevalencia de 1.99%), la región amazónica (1.75%) y las tierras altas del sur (0.65%). La incidencia se estimó en 36 casos / 100,000 habitantes / año, resultando en 4,400 casos nuevos cada año. En el periodo 2004-2014 se registraron 915 casos, con un incremento sustancial durante los dos últimos años (23).

#### **1.1.1.2 Pronóstico**

El cambio climático contribuirá a la ampliación del rango de distribución geográfica de los vectores *Aedes aegypti*, *Simulium damnosus* y *Tripanosoma cruzi*, y esto a su vez supone un incremento en el número de casos por contagio de enfermedades como: dengue, paludismo, fiebre amarilla, chikunguña, Zika, ceguera de los ríos, Chagas, entre otras.

#### **1.1.2 Formulación del problema**

¿Cuál será la distribución geográfica de vectores y su efecto en enfermedades infecciosas producidas por variables climáticas en el Ecuador continental?

### **1.1.3 Sistematización del problema**

¿Cuál será la distribución geográfica del potencial de especies vectores en Ecuador?

¿Cuál será el área de distribución potencial de invasión de las especies de vectores de enfermedades en escenarios de cambio climático?

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Determinar la distribución geográfica de vectores y su efecto en enfermedades infecciosas, producidas por variables climáticas en Ecuador.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

1. Identificar la distribución geográfica del potencial de especies vectores en Ecuador durante el periodo 2019.
2. Proyectar el área de distribución potencial de invasión de las especies de vectores de enfermedades en escenarios de cambio climático.

## **1.3 Justificación**

La importancia de este proyecto de investigación se fundamenta en la medida en la que permita obtener una mejor comprensión de los patrones de riqueza de especies de vectores de enfermedades, la estructura de la comunidad y otros aspectos relacionados con la adaptación de las especies a diferentes condiciones ambientales, puesto que esto es de gran relevancia en términos ecológicos y evolutivos. En este sentido, la distribución de las enfermedades transmitidas por vectores se ha visto alterada como consecuencia de la incidencia directa del cambio climático global.

Los insuficientes cuidados preventivos y las variables climáticas influyen en la transmisión de patógenos, haciendo que la temporada de transmisión sea más prolongada o intensa, o que aparezcan enfermedades en áreas geográficas en donde antes eran inexistentes, dificultando aún más la evaluación y erradicación de las infecciones. Ante ello es necesario disponer de información actualizada acerca de la distribución actual y futura de las especies de vectores, que permita establecer mecanismos idóneos de control y vigilancia

En virtud de ello la presente investigación tuvo como fin proporcionar información de primera mano acerca de las áreas de distribución potencial de vectores de enfermedades, a fin de que dicha información pueda ser analizada por las autoridades de medio ambiente y salud del Ecuador, con miras al diseño de medidas de prevención y control de vectores y sus enfermedades asociadas.

## **CAPÍTULO II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN**

## **2.1 Marco conceptual**

### **2.1.1 Cambio climático**

La Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC), en su artículo 1, define el “cambio climático” como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observado durante períodos de tiempo comparables. Para el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), [el término como tal] denota un cambio en el estado del clima identificable (por ejemplo, mediante análisis estadísticos) a raíz de un cambio en el valor medio y en la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un período prolongado, generalmente cifrado en decenios o en períodos más largos. Sin embargo (24), sostiene que el cambio climático global se refiere a las modificaciones en cualquier aspecto del clima del planeta, tales como la temperatura, precipitación e intensidad y las rutas de las tormentas.

El cambio climático es un desafío importante para las especies y los ecosistemas, lo que resulta en modificaciones significativas en los patrones y procesos de biodiversidad en todo el mundo (25).

#### **2.1.1.1 Escenarios de cambio climático**

Los escenarios de cambio climático son proyecciones de futuras emisiones de gases de efecto invernadero utilizadas por analistas para evaluar la vulnerabilidad futura al cambio climático. La producción de escenarios requiere estimaciones de los niveles de población futuros, la actividad económica, la estructura de gobierno, los valores sociales y los patrones de cambio tecnológico. El modelado económico y energético (como los modelos World3 o POLES) se puede utilizar para analizar y cuantificar los efectos de dichos impulsores (26).

Los escenarios de cambio climático son escenarios de cambios climáticos plausibles. Los utilizamos para comprender cuáles pueden ser las consecuencias del cambio climático. También podemos utilizarlos para identificar y evaluar las estrategias de adaptación (27).

Creamos escenarios de cambio climático porque las predicciones de cambio climático a escala regional tienen un alto grado de incertidumbre. Por escala regional, nos referimos típicamente a la escala subcontinental a nivel de país a nivel provincial. Aunque es probable que las temperaturas aumenten con el tiempo en la mayoría de las regiones del mundo, los

cambios a escala regional en muchas otras variables clave, como las precipitaciones, son inciertos para la mayoría de las regiones. Incluso cuando la dirección del cambio es segura o probable, existe incertidumbre sobre la magnitud y la trayectoria del cambio. Creamos escenarios como herramientas para ayudarnos a entender cómo pueden cambiar los climas regionales y cómo los sistemas sensibles pueden verse afectados por el cambio climático (27).

### **2.1.2 Variable climática**

Es una variable física, química o biológica o un grupo de variables vinculadas que contribuyen de manera crítica a la caracterización del clima de la Tierra. Proporcionan evidencia empírica necesaria para comprender y predecir la evolución del clima, guiar las medidas de mitigación y adaptación, para evaluar los riesgos y permitir la atribución de los eventos climáticos a las causas subyacentes, y para respaldar los servicios climáticos (28).

Éstas variables se identifican según los siguientes criterios: i) Relevancia: La variable es crítica para caracterizar el sistema climático y sus cambios; ii) Viabilidad: observar o derivar la variable a escala global es técnicamente factible utilizando métodos probados y científicamente entendidos; iii) Rentabilidad: la generación y el archivo de datos sobre la variable es asequible, y se basa principalmente en sistemas de observación coordinados que utilizan tecnología probada, aprovechando siempre que sea posible los conjuntos de datos históricos (29).

### **2.1.3 Vector**

En epidemiología, un vector de enfermedad es cualquier agente que transporta y transmite un patógeno infeccioso a otro organismo vivo; la mayoría de los agentes considerados vectores son organismos, como los parásitos intermedios o los microbios, pero podría ser un medio inanimado de infección, como las partículas de polvo. Estos vectores pueden transportar patógenos infecciosos como virus, bacterias y protozoos, que se puede transferir de un host (operador) a otro (30).

Los vectores y huéspedes involucrados en la transmisión de estos patógenos infecciosos son sensibles a cambio de temperatura y otros factores ambientales que, en conjunto, afectan las enfermedades transmitidas por vectores al influir en uno o más de los siguientes: supervivencia, reproducción, desarrollo, actividad, distribución y abundancia de vectores y hospedantes; patógeno desarrollo, replicación, mantenimiento y transmisión; rango

geográfico de patógenos, vectores y huéspedes; comportamiento humano; y frecuencia, aparición y distribución de brotes de enfermedades (31).

#### **2.1.4 Enfermedades transmitidas por vectores**

Las enfermedades transmitidas por vectores son causadas por parásitos, virus y bacterias transmitidos por mosquitos, *flebótomos*, chinches *triatomíneas*, *simúlidos*, garrapatas, moscas tsetsé, ácaros, caracoles y piojos. En todo el mundo se registran cada año más de 700 000 defunciones como consecuencia de enfermedades transmitidas por vectores, tales como el paludismo, dengue, *esquistosomiasis*, *tripanosomiasis* africana humana, *leishmaniasis*, enfermedad de Chagas, fiebre amarilla, encefalitis japonesa y *oncocercosis*. En su conjunto, las enfermedades transmitidas por vectores representan aproximadamente un 17% de las enfermedades infecciosas. La mayor carga de estas enfermedades, que afectan de forma desproporcionada a las poblaciones más pobres, corresponde a las zonas tropicales y subtropicales. Desde 2014, grandes brotes de dengue, paludismo, fiebre chikungunya, fiebre amarilla y enfermedad por el virus de Zika han azotado a diferentes poblaciones, cobrándose vidas y abrumando los sistemas de salud en muchos países (31).

##### **2.1.4.1 Insecto**

Por su número y diversidad, los Insectos constituyen el subfilo más importante de los Artrópodos, representando además el 80% de las especies animales conocidas en la actualidad. Aunque la mayoría son terrestres, los hay de agua dulce, parásitos e, inclusive, especies que viven en la superficie del mar, en la zona litoral, en las cumbres más elevadas, en los polos, en los desiertos, etc., y son uno de los escasos grupos animales que han colonizado el medio aéreo. Presentan el cuerpo diferenciado en tres tagmas: cabeza, tórax y abdomen, con tres pares de patas (*Hexápodos*) y dos pares de alas que pueden estar modificadas, reducidas e incluso ausentes. Tienen piezas bucales masticadoras, chupadoras o lamedoras; un par de antenas y un par de ojos compuestos y hasta tres ojos simples u ocelos. La respiración, en general, la realizan por tubos traqueales. Los sexos son separados, generalmente con una sola abertura sexual en el extremo del abdomen, normalmente son ovíparos. Después de la emergencia del huevo sufren metamorfosis, gradual o brusca (32).

#### **2.1.4.2 Parásito**

Es un organismo que vive dentro o dentro de otro organismo (huésped) y se beneficia (por ejemplo, al obtener nutrientes) del huésped a expensas del huésped. Aunque esta definición en realidad se aplica a muchos microbios, incluidas bacterias, hongos y virus (33).

#### **2.1.5 *Aedes aegypti***

El mosquito *Aedes aegypti* es el principal vector de los virus que causan el dengue. Los seres humanos se infectan por picaduras de hembras infectadas, que a su vez se infectan principalmente al succionar la sangre de personas infectadas. El virus infecta el intestino medio del mosquito y luego se extiende hasta las glándulas salivales en un período de entre 8 y 12 días. Tras este período de incubación, el mosquito puede transmitir el virus a las personas al picarlas con fines exploratorios o alimentarios (34).

#### **2.1.6 *Simulium damnosus***

La *oncocercosis* o “ceguera de los ríos”, que afecta a cerca de 18 millones de personas, abunda sobre todo en África tropical, particularmente en las cuencas fluviales de la sabana situada al sur del Sahara. La zona endémica se extiende hasta el sur de la Península Arábiga y también existen focos en América Central y del Sur. La enfermedad está causada por el gusano nematodo filárico *Onchocerca volvulus*. Las formas larvianas se transmiten por picadura de un mosquito infectado del género *Simulium* (“mosca negra”). Las larvas se transforman al madurar en gusanos adultos o *macrofilarias* en el curso de uno o dos años, por lo general en el tejido subcutáneo, donde forman nódulos. Los principales síntomas de la enfermedad, el prurito intenso y la pérdida gradual de la visión, están causados por la migración de las numerosas *microfilarias* producidas por los gusanos hembra y que se alojan de preferencia en la dermis, donde puede sorberlos el mosquito vector, y en el ojo, donde provoca inflamación local y cicatrices (34).

#### **2.1.7 *Tripanosoma cruzi***

La enfermedad de Chagas, también llamada *tripanosomiasis* americana, es una enfermedad potencialmente mortal causada por el parásito protozoo *Trypanosoma cruzi*. Se calcula que en el mundo hay entre 6 y 7 millones de personas infectadas por *Trypanosoma cruzi*, el parásito causante de la enfermedad de Chagas. La enfermedad de Chagas se encuentra sobre todo en zonas endémicas de 21 países de América Latina, donde se transmite a los seres

humanos principalmente por las heces u orina de insectos *triatomíneos* conocidos como vinchucas, chinches o con muchos otros nombres, según la zona geográfica. El costo del tratamiento de esta enfermedad sigue siendo considerable; solo en Colombia, el costo anual estimado en 2008 de la atención médica a todos los pacientes fue de aproximadamente US\$ 267 millones. Por otra parte, la fumigación de insecticidas para controlar los vectores costaría cerca de US\$ 5 millones al año, es decir, menos de un 2% de los costó de la atención médica. La enfermedad lleva el nombre de Carlos Ribeiro Justiniano Chagas, médico e investigador brasileño que la descubrió en 1909 (34).

Es una especie de mosquito originaria del África. Debido a su alta capacidad para adaptarse a sobrevivir en asentamientos humanos, *A. aegypti* se ha extendido por todo el planeta, generalmente a lo largo de rutas comerciales y turísticas. Es el principal vector de cuatro *arbovirosis* humanas: fiebre amarilla, fiebre del dengue, fiebre chikungunya y fiebre Zika (35).

Se sabe que *Simulium damnosum* ss y *S. sirbanum* son capaces de realizar migraciones regulares asistidas por el viento de > 400 km, y pueden moverse en cantidades tan grandes que pueden amenazar el éxito de los esfuerzos de control en las áreas a las que llegan (36).

El parásito protozoario *Trypanosoma cruzi* (orden *Kinetoplastida*) causa la enfermedad de Chagas, una de las principales enfermedades tropicales en las Américas. La variación genética intraespecífica de esta especie es compleja, y se han hecho varios intentos para establecer los principales linajes intraespecíficos. Actualmente, *T. cruzi* se divide en dos subespecies: *T. c. cruzi* y *T. c. marinkellei* (37).

La enfermedad de Chagas o *tripanosomiasis* americana, es causada por una infección por el hemoflagelado protozoario *Trypanosoma cruzi*, que se transmite a los humanos a través de picaduras de insectos triatominos infectados. La infección está muy extendida en América Latina, aunque se ha descrito un número creciente de casos en países no endémicos (20).

### **2.1.8 Puntos de presencia**

La información sobre la presencia-ausencia de las especies se puede obtener de varias formas. La más común y fácil de adquirir son datos de campo que reflejen los sitios de avistamiento de las especies. Esta vía constituye una fuente de información confiable porque asume que el sitio donde se detecta un individuo forma parte de su hábitat. Las publicaciones científicas también constituyen fuentes de datos de presencia de especies.

Mediante un buen trabajo de búsqueda y compilación de estudios previos, pueden obtenerse datos confiables de avistamientos de las especies. Otra forma de adquirir información de este tipo, son las colecciones biológicas, porque en los datos de cada ejemplar está la ubicación del lugar de colecta (38).

Los modelos de distribución de especies generalmente usan tres tipos diferentes de datos espaciales, que se denominan datos de presencia-fondo (PB), presencia-ausencia (AP) y detección de ocupación. Los PB contienen una lista de "presencias" o ubicaciones donde se han observado individuos, pero no disponen información sobre ausencias de especies; a menudo están disponibles en "encuestas oportunistas" y pueden obtenerse de colecciones de museos y herbarios, registros de bases de datos históricas, y repositorios en línea como el Global Biodiversity Information Facility. Los datos AP proporcionan información sobre si se detectó una especie o no en todos los sitios de muestreo del área de estudio. Tanto los datos de PA como los de detección de ocupación son difíciles de obtener, ya que requieren esfuerzos de encuesta intensivos y extensos para obtener información de PA en todos los sitios encuestados. Se han desarrollado muchos métodos para modelar datos de AP y detección de ocupación, y proporcionan una revisión exhaustiva de la literatura (39).

### **2.1.9 Sistemas de Información Geográfica**

Los sistemas de información geográfica (SIG) son un poderoso conjunto de herramientas para recolectar, almacenar, extraer, transformar y desplegar datos espaciales del mundo real para un propósito particular, también se puede definir a un SIG como una tecnología de manejo de información geográfica, formada por equipos de cómputo (hardware) que son programados adecuadamente (software), que permiten manejar una serie de datos espaciales (información geográfica) y realizar análisis complejos (métodos y procedimientos) siguiendo los criterios impuestos por el equipo científico para apoyar la toma de decisiones (personal-usuarios), y compartir la información (red) (40).

Un SIG permite realizar análisis espaciales complejos, como el área máxima ocupada por una especie en distintas escalas temporales, el porcentaje de esta área superpuesto con la distribución de otra especie, el porcentaje del área ocupado por cada tipo de suelo; así como análisis de dependencia entre variables, como el número total de individuos o especies monitoreados en un determinado rango altitudinal o unidad vegetacional, y los diferentes tipos de hábitat ocupados por una especie. Permite además formular modelos, usando la base

de datos digital para simular los efectos de un proceso dado, en un tiempo determinado, con diferentes escenarios (41) (42).

En la actualidad, el uso de sistemas de información geográficos constituye una de las herramientas más valiosas para la evaluación de recursos naturales, ya que facilita el estudio del espacio geográfico desde un contexto espacial temporal. Un SIG permite no solo la creación de una gran cantidad de información visual, sino también la realización de análisis futuros a través del seguimiento de variables claves que permiten evaluar tendencias en la distribución de especies a través del tiempo (43).

#### **2.1.10 Nicho ecológico**

La palabra nicho no sugiere un lugar, sino una idea. El nicho se refiere a los límites impuestos a los organismos por las condiciones ambientales. Por lo tanto, didácticamente hablando, un hábitat puede proporcionar muchos nichos diferentes, donde viven diferentes organismos, mientras que un nicho se refiere a la forma en que viven en las áreas que habitan (44). Genéricamente engloba todo aquello que condiciona la existencia de una especie en un lugar determinado, incluyendo factores abióticos como la temperatura, la humedad, las precipitaciones y factores bióticos como la presencia de alimentos, la competencia, los depredadores, los refugios, etc. (45).

El denominado “nicho Grinneliano” (1917) enfatiza la componente ambiental, centrándose en los factores que limitan la distribución de las especies; aquí el nicho se concibe como una característica del medio y no de las especies. En sentido opuesto, el “nicho Eltoniano” (1927) propone una visión en la que se destaca el papel activo de los seres vivos en comunidad, relegando los factores ambientales a un segundo plano. Hutchinson (1957) definiría el nicho ecológico como el espacio n dimensional en el que cada dimensión representa la respuesta de un ser vivo a la variación de un determinado factor, siendo, por tanto, el producto de todos los factores que influyen sobre un organismo. Hutchinson (1978) llega a sugerir la idea de que el nicho de una especie puede incluir un rango de condiciones sin correspondencia física en el espacio geográfico (46).

#### **2.1.11 Algoritmo de Maxent**

Maxent está fundamentado en el concepto de máxima entropía, utilizando una aproximación mecanicista para realizar predicciones a partir de información incompleta. Maxent estima la distribución más uniforme (de ahí el concepto de máxima entropía) a lo largo del área de

estudio con la restricción de que el valor esperado para cada variable ambiental en una distribución concuerda con su promedio empírico (valores promedio para el conjunto de datos de ocurrencia). Maxent pesa cada característica (variable ambiental) al multiplicarla por una constante, y la divide posteriormente para asegurar valores de probabilidad entre 0 y 1. El programa inicia con una distribución uniforme de probabilidades e iterativamente altera el peso de una variable a la vez para maximizar la similitud de los datos de ocurrencia. El algoritmo está garantizado para converger en la distribución probabilística óptima, y dado que no aleatoriza, los resultados son determinísticos. Las predicciones de Maxent para cada celda analizada hacen referencia a valores acumulativos, representando como porcentaje el valor de probabilidad para la celda en cuestión y todas aquellas con valores iguales o menores de probabilidad. Una celda con valor de 100 es la más adecuada, mientras que celdas con valores cercanos a 0 son las menos adecuadas dentro del área de estudio (47) (48).

#### **2.1.12 Modelos de distribución de especies**

Los modelos de distribución de especies son modelos que relacionan las observaciones de campo de los taxones con variables ambientales predictivas, basadas en una respuesta estadística o teórica. Sin embargo, aunque parecen lo mismo, pensamos que existe una diferencia, aunque sutil, entre ambos conceptos. Estos modelos utilizan el nicho ecológico como base teórica, son herramientas muy útiles para resolver preguntas de ecología aplicada, conservación y biogeografía, debido a las bases ecológicas y evolutivas subyacentes. Se han desarrollado varios modelos que ayudan a comprender algunas de las dimensiones ambientales y ecológicas en las que se encuentra un taxón, principalmente aquellas relacionadas con factores abióticos (precipitación, temperatura, entre otras) y bióticos (tipos de vegetación en las cuales se puede encontrar) (47).

#### **2.1.13 NicheToolbox**

NicheToolbox es un paquete R con una interfaz gráfica de usuario (GUI) amigable desarrollada utilizando un marco brillante que tiene como objetivo facilitar el proceso de construcción de modelos de nicho y estimar las distribuciones de especies. La plataforma incorpora funciones propias y otras disponibles en diferentes paquetes de R (p.ej., dismo, ENMGadgets, spocc) para buscar datos de presencia, limpiar duplicados, seleccionar variables ambientales, calibrar algoritmos de nicho ecológico (p.ej., Bioclim, MaxEnt y modelos basados en elipsoides) y evaluar los modelos de distribución con las métricas dependientes de umbral, como la sensibilidad, o independientes, como el AUC

(area under the curve) de la curva ROC (receiver operating characteristic) y la ROC parcial. Una de las características notables de NicheToolBox es que cuenta con funciones para descargar el flujo de trabajo (workflow) de lo que el usuario ha hecho dentro de la aplicación. Este flujo de trabajo, además de contener los archivos de los análisis realizados en la sesión, guarda en un documento el código de R con el que los produjo (49) (50).

#### **2.1.14 Global Biodiversity Information Facility (GBIF)**

El Fondo Mundial de Información sobre Biodiversidad (GBIF) es una organización internacional que se enfoca en hacer que los datos científicos sobre la biodiversidad estén disponibles a través de Internet mediante servicios web. Los datos son proporcionados por muchas instituciones de todo el mundo; la arquitectura de información de GBIF hace que estos datos sean accesibles y buscables a través de un solo portal. Los datos disponibles a través del portal GBIF son principalmente datos de distribución sobre plantas, animales, hongos y microbios para el mundo, y datos de nombres científicos (51) (52).

La plataforma de GBIF tiene como fin facilitar el acceso libre y abierto a los datos de biodiversidad en todo el mundo para apuntalar el desarrollo sostenible. Las prioridades, con énfasis en promover la participación y trabajar a través de socios, incluyen la movilización de datos de biodiversidad, el desarrollo de protocolos y estándares para garantizar la integridad científica y la interoperabilidad, la construcción de una arquitectura informática que permita la interconexión de diversos tipos de datos de fuentes dispares, promoviendo la creación de capacidades y catalizando desarrollo de herramientas analíticas para mejorar la toma de decisiones (53).

Proporciona "una red interoperable de bases de datos de biodiversidad y herramientas de tecnología de la información accesibles a Internet", con la "misión de hacer que los datos de biodiversidad del mundo estén disponibles de forma libre y universal a través de Internet" y ha sido descrita como un "recurso fundamental". Actualmente, el portal GBIF proporciona acceso a información sobre biodiversidad de museos, herbarios y otras organizaciones de todo el mundo. Hay 199 instituciones anfitrionas que proporcionan más de 120 millones de registros (54).

#### 2.1.15 World Clim 1.4

WorldClim es un conjunto de capas climáticas globales (cuadrículas climáticas) con una resolución espacial de aproximadamente 1 kilómetro cuadrado. Los datos pueden usarse para mapeo y modelado espacial en un SIG o con otros programas de computadora. Si no se está familiarizado con dichos programas, puede probarse DIVA-GIS o el paquete R raster. Disponen de un repositorio abierto y libre, que ha permitido un desarrollo exponencial de los trabajos sobre biogeografía, macroecología y cambio climático en los últimos 10 años. WorldClim permite la descarga de 19 variables climáticas, a diferentes resoluciones espaciales y en diferentes formatos raster. Además de la interpolación espacial para el presente, con datos de estaciones meteorológicas de entre 1950 a 2000, Worldclim también dispone de capas SIG con información sobre las mismas variables climáticas en el pasado y en el futuro. Para generar estas capas combinan información sobre cambio climático proveniente de modelos de circulación global (AOGCMs (atmosphere-ocean coupled general circulation models), modelos físicos sobre dinámica climática) y su capa para el presente (proveniente de una interpolación) (55) (56)

En total son 11 variables de temperatura (BIO1- BIO11) (temperatura media anual (BIO1), máximas y mínimas mensuales y cuatrimestrales, estacionalidad, etc.) y 8 variables de precipitación (BIO12-BIO19) (precipitación anual, máximas y mínimas mensuales, cuatrimestrales, estacionalidad, etc.). En la web del Worldclim existe una descripción completa de las variables (<https://www.worldclim.org>) (55).

El conjunto de datos de WorldClim es probablemente el más famoso conjunto de datos sobre el clima en cuadrícula, ampliamente utilizado para la gestión ecológica de los recursos naturales. Gracias a su alta resolución (30 arcos segundos en el sistema de referencia WGS84 y aproximadamente 1 km en el ecuador), cobertura global y disponibilidad, ha sido utilizado y citado más de 5200 veces desde su publicación. El set de datos es adecuado para estudios básicos y aplicados en ecología, incluyendo silvicultura y modelación ecológica, así como para construir conjuntos de datos relacionados, como zonas biogeográficas o estratificaciones ambientales. Uno de los principales productos de esta base de datos es la "versión 1", representativa del clima de 1961-1990, período normal para todo el mundo, incluida la Antártida. Este set de datos de la versión 1 fue generado por interpolación de datos de estaciones meteorológicas con el software ANUSPLIN (versión 4.3) utilizando latitud y longitud (57).

## **2.2 Marco teórico**

### **2.2.1 Factores que causan el cambio climático**

El cambio climático se refiere a las oscilaciones en la tierra global o el clima regional en el intervalo de tiempo y define esos cambios que fluctúan con las condiciones atmosféricas medias o con la media el tiempo (común) en intervalos de tiempo que fluctúan entre décadas y millones de años. Estos cambios pueden haber sido resultado de procesos internos de la tierra o de fuerzas más allá de ella (como las oscilaciones en la intensidad de la luz solar) o en tiempos recientes debido a las actividades relacionadas con los cambios climáticos provocados por el hombre. Especialmente en aplicaciones recientes en materia de medio ambiente el cambio climático; a menudo se refiere a los cambios actuales en el nuevo clima, como la temperatura media aumento de la superficie terrestre conocido como calentamiento de la tierra. En algunos la expresión de; cambio climático; también se aplica a la relación de causa y efecto humana tal como se utiliza en el cambio climático convención marco de las naciones unidas utiliza la expresión; oscilaciones climáticas; para los cambios de origen no humano (58).

Los factores que afectan los cambios de temperatura media de la tierra y el cambio climático son los cambios en el desnivel del mar, los efectos de las nubes, la emisión de aerosoles a la atmósfera, aumento en las emisiones de dióxido de carbono, gas metano, hidratos de metano. Además, los cambios de reflexión terrestres y los cambios en el campo magnético exterior. También existen otros factores como la contaminación del aire, los cambios en el hielo polar, el contenido en vapor de agua y la cantidad de cobertura de nubes y la cantidad de energía solar que alcanza la Tierra (59).

Los informes del IPCC resaltan que las causas del cambio climático son de origen natural y antropogénicas. Hay una cadena de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), las concentraciones atmosféricas, el forzamiento radiactivo, las respuestas climáticas y los efectos del clima. Entre 1970 y 2004, el aumento más importante de las emisiones de GEI proviene de los sectores de suministro de energía, transporte e industria, mientras que la vivienda y el comercio, la silvicultura (incluida la deforestación) y la agricultura han crecido más. Las actividades humanas generan emisiones de cuatro GEI de larga permanencia: CO<sub>2</sub>, metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y halocarbonos (grupo de gases que contienen flúor, cloro o bromo). Los modelos muestran que el dióxido de carbono ocupa el 56.5 % (60).

Además de la variabilidad climática natural, existen tres maneras fundamentales en las que se puede afectar el sistema climático global mediante la alteración del balance energético de la Tierra. Estas son: (i) cambios en la radiación solar entrante. Esto ocurre por los cambios en la órbita de la Tierra y las variaciones en la actividad solar; (ii) cambios en el porcentaje de radiación solar reflejada. Este porcentaje se puede cambiar por los cambios en la cobertura de nubes, pequeñas partículas llamadas aerosoles o por cambios en la cobertura del suelo; (iii) alteración de la fracción de energía de onda larga liberada de vuelta al espacio. Esta alteración se debe principalmente a cambios en la composición de la atmósfera como resultado de las variaciones en las concentraciones de GEI. Para saber con certeza si el balance energético de la Tierra ha sido o puede ser alterado, los científicos recurren a la medición y análisis del forzamiento radiactivo. El forzamiento radiactivo<sup>4</sup> permite cuantificar modificaciones en los flujos de energía del planeta, ocasionados por los cambios producidos por las sustancias y los procesos naturales y antropogénicos. Cuando el forzamiento radiactivo tiene un valor positivo, se produce un calentamiento; y cuando tiene un valor negativo, un enfriamiento (61).

#### *A. Factores de cambio climático*

Oscilaciones oceánicas, casi en las escalas de tiempo de algunas décadas, el cambio climático puede también ser el resultado de los cambios en el intersistema oceánico-atmosférico. La mayoría de las condiciones climáticas son las más evidentes de todas, la oscilación meridional del “Niño” también incluye diez años Pacífico, Océano Atlántico Norte y Océano Antártico, oscilaciones conocidas como condiciones especiales en el sistema climático que por lo menos ha sido salvado en los océanos debido a su presencia por diferentes métodos cálidos y desplazados entre diferentes fuentes. En escalas de tiempo más largas, los procesos oceánicos tales como la revolución termohalina juegan un papel clave en la redistribución del calor y, en el caso del cambio, puede influir en el clima severamente (58).

Memoria climática (Restauración), la mayoría de las formas de oscilación en un sistema climático pueden ser considerado como histerético; significa que el clima actual no sólo indica sus insumos, sino también la historia de su surgimiento y llegando a esta etapa. Por ejemplo, una sequía de una década puede la destrucción de los lagos; la desecación completa de las llanuras y desarrollo del desierto. En cambio, estas condiciones pueden causar menos precipitaciones en los años actuales. En resumen, el cambio climático puede ser un proceso

permanente de autorregulación debido a que diferentes los aspectos ambientales responden a las inevitables fluctuaciones de las diferentes proporciones y formas (58) (62).

### *B. Factores no climáticos que causan el cambio del clima*

Gases de Invernadero, estudios recientes muestran que la fuerza de la radiación por el invernadero es el principal factor del calentamiento global. Gases de efecto invernadero tienen un papel importante en la comprensión de la tierra desde el punto de vista climático historia. Sobre la base de estos estudios, el efecto invernadero que produce calor por los gases de efecto invernadero tiene un papel clave en la adaptación la temperatura de la Tierra. Durante los últimos 600 millones de años, la cantidad de El dióxido de carbono ha sido probablemente cambiado de más de 500 a menos de 200 ppm, lo que se debe principalmente a la influencia de la de los procesos geológicos y de las innovaciones biológicas (58).

Pero hay varias muestras de cambios rápidos en la cantidad de gases de efecto invernadero en la atmósfera terrestre que tiene aparentemente una relación estrecha con un calentamiento severo como como el período máximo de Suzan Paterson (Paleocene-Iverson, de Permiano-Terrásico), períodos de disminución de dinosaurios y el fin del período de las heladas de la tierra en Región de Escandinavia. Durante el nuevo período el nivel creciente de se considera que el dióxido de carbono es el principal factor causante de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial desde 1950 hasta ahora.

### **2.2.2 Cambio climático y distribución espacial de especies**

Los regímenes climáticos influyen sobre la distribución de las especies a través de sus umbrales fisiológicos de tolerancia a la temperatura y precipitación. Actualmente esta distribución está cambiando en latitud hacia los polos y también a mayores altitudes. La tasa de cambio de los rangos varía entre las distintas especies y dentro de una misma especie, implicando capacidades diferentes de dispersión. Un incremento de apenas 1°C puede causar cambios significativos en la composición y distribución de ciertas poblaciones. Las especies tendrían que migrar algo más de 3 km al año para adaptarse al cambio climático. Las respuestas individuales de las especies al cambio climático pueden desorganizar sus interacciones con otras del mismo o adyacente nivel trófico y es posible que cambios rápidos en el clima o eventos extremos puedan alterar la composición y estructura de las comunidades (63).

Los cambios en variables climáticas han producido una frecuencia e intensidad cada vez mayor de brotes de plagas y enfermedades acompañadas de desplazamientos hacia el polo o hacia altitudes más altas de los organismos que producen enfermedades/plagas. La distribución de enfermedades infecciosas transmitidas por vectores (como la malaria y el dengue) y las transmitidas por los alimentos y el agua (como la diarrea) se han visto afectadas por cambios en factores climáticos (64).

Se prevé que el cambio climático tendrá efectos directos sobre los organismos individuales, sobre las poblaciones y sobre los ecosistemas. En cuanto a los individuos, se ha encontrado que el cambio climático podría afectar su desarrollo, fisiología y sus comportamientos durante las fases de crecimiento, reproducción y migración. Por otra parte, es probable también que la modificación en los patrones de precipitación y el aumento de la temperatura afecten la distribución, tamaño, estructura y abundancia de las poblaciones de algunas especies. Lo anterior, sumado a los efectos del cambio climático sobre el ciclo hidrológico, podría afectar las interacciones entre las especies, los ciclos de nutrientes y el funcionamiento, estructura y distribución misma de los ecosistemas. Esto, traería como consecuencia la alteración en los flujos y calidad de los servicios ambientales que prestan los ecosistemas (1) (65).

Entre los principales impactos del cambio climático sobre la biodiversidad en América Latina y el Caribe, se incluyen: (i) cambios en la dinámica de las poblaciones de fauna y flora cuyos ciclos de vida dependen del regular funcionamiento de cuerpos de agua cuya dinámica se vería afectada por aumentos en la variabilidad climática y por cambios en la disponibilidad de agua. Lo anterior sería particularmente evidente en las zonas áridas y semiáridas de la región. En todo caso, es factible también que los efectos no siempre sean negativos, y que algunas especies vean aumentado el tamaño de sus poblaciones. (ii) afectación de sistemas agrícolas por los cambios, desplazamientos o la extinción local de poblaciones de especies polinizadoras y de controladores biológicos de plagas y enfermedades (1) (66).

Se prevé que los efectos directos que el cambio climático generará sobre la biodiversidad serán de tres niveles: (i) El primer nivel está relacionado con los efectos sobre cada individuo de cada especie, ya que su desarrollo, sus funciones vitales y su comportamiento podrían alterarse. Por ejemplo, las aves de las montañas tropicales se encuentran entre las más vulnerables al cambio climático, debido a que el aumento en la temperatura las ha obligado

a migrar a zonas con mayor elevación en las que difícilmente podrían encontrar los elementos necesarios para sobrevivir. En este sentido, cada vez cuentan con menores áreas disponibles para sobrevivir. (ii) El segundo nivel está relacionado con los efectos sobre las poblaciones a las que pertenecen estos individuos, ya que los patrones de lluvia e incrementos de temperatura generarían cambios en la forma en la que estas poblaciones están distribuidas, su tamaño, la forma en la que se estructuran y su abundancia. Por ejemplo, se ha observado que la exposición de los embriones del sapo occidental a la luz podría hacerlos más susceptibles a ser infectados por el microorganismo *Saprolegnia ferax*, incrementando así su tasa de mortalidad. (iii) El tercer nivel está relacionado con los efectos sobre los ecosistemas, por efecto de las alteraciones de los ciclos naturales. Por ejemplo, la pérdida y la retirada de los glaciares en los páramos, lagunas y bosques alto andinos, podría generar cambios en el ciclo del agua, alterando la forma de vida de las poblaciones (66) (64).

### **2.2.3 Efectos del cambio climático sobre las enfermedades transmitidas por vectores**

Las temperaturas y la cantidad de nieve y lluvia, tanta influencia en el clima. La temperatura y la cantidad de lluvia en cualquier región están influenciadas por su ancho geográfico, y corrientes oceánicas que dejan efectos desfavorables. Algunos de consecuencias conocidas causadas por el cambio climático son sigue (58):

1. Subida del nivel del mar y disminución de las fuentes de agua dulce.
2. Cambiar la cantidad de lluvia y la dirección del viento.
3. El aumento de las calamidades naturales como la tormenta Huracán y inundación.
4. Aumentar la cantidad de sequías y desiertos desarrollo.
5. El aumento de la contaminación atmosférica en algunas regiones debido al aumento de la de vientos cálidos.
6. El posible efecto sobre la propagación de enfermedades como la malaria.

En América del Sur, el paludismo, la leishmaniasis, el dengue, la enfermedad de Chagas y las esquistosomiasis son las principales enfermedades de transmisión vectorial sensibles al clima en lo que respecta al número de personas afectadas. Otras enfermedades de transmisión vectorial, de las que se dan pocos casos cada año y que pueden ser sensibles al cambio climático, son la fiebre amarilla, la peste, la encefalitis y otras infecciones

*arbovirales*. Hasta 1991, solo en la región amazónica brasileña se aislaron 183 tipos distintos de *arbovirus*, y se sabe que 34 de ellos causan enfermedades humanas, a veces en forma de epidemias virulentas. Una de ellas, la fiebre de *oropouche*, se produce en ciclos asociados con el comienzo de la estación lluviosa (67) (68).

Se estima que en 2100 la temperatura mundial habrá aumentado en promedio de 1,0 a 3,5 °C, con lo que aumentará también el riesgo de sufrir numerosas enfermedades transmitidas por vectores. Los cambios temporales y espaciales de las temperaturas, las precipitaciones y la humedad que, según las previsiones, tendrán lugar según los diferentes escenarios del cambio climático, afectarán a la biología y ecología de los vectores y los huéspedes intermedios y, por consiguiente, al riesgo de transmisión de enfermedades. El riesgo aumenta porque, aunque los artrópodos pueden regular su temperatura interna modificando su comportamiento, no pueden hacerlo fisiológicamente y, por lo tanto, dependen totalmente del clima para su supervivencia y desarrollo (67).

En América del Sur, el paludismo, la *leishmaniosis*, el dengue, la enfermedad de Chagas y la *esquistosomiasis* son las principales enfermedades de transmisión vectorial sensibles al clima en lo que respecta al número de personas afectadas. El paludismo es la más extendida y grave de las enfermedades de transmisión vectorial sensibles al clima. Los estudios realizados han puesto de manifiesto que unas condiciones desusadamente secas (por ejemplo, las provocadas por el tiempo relacionado con el fenómeno El Niño/ Oscilación Austral en la zona norte del continente) van acompañadas o seguidas de un aumento de la incidencia de la enfermedad. Los cambios en las condiciones físicas que determinan la supervivencia de los vectores (humedad y criaderos) y las influencias en los depredadores de los insectos y los reservorios de vertebrados son los posibles mecanismos de esa interferencia. Las oscilaciones climáticas pueden afectar a la dinámica de la fiebre del dengue, transmitida por el mosquito *Aedes aegypti*, una especie predominantemente urbana. En América Latina, aproximadamente el 78% de la población, unos 81 millones de personas, viven en núcleos urbanos, y la enfermedad ha aumentado durante el último decenio (67) (69).

Tanto la temperatura como las aguas de superficie influyen considerablemente en los insectos vectores de enfermedades. Tienen especial importancia las especies de mosquitos vectores, que propagan la malaria y enfermedades víricas como el dengue y la fiebre

amarilla. Los mosquitos necesitan aguas estancadas para reproducirse, y los adultos necesitan un medio húmedo para sobrevivir. Unas temperaturas más elevadas favorecen la reproducción de los vectores y reducen el periodo de maduración de los microorganismos patógenos en su interior. Sin embargo, en condiciones de mucho calor y sequedad, la supervivencia del mosquito puede reducirse. Los agentes infecciosos varían mucho en tamaño, tipo y modo de transmisión. Existen virus, bacterias, protozoos y parásitos pluricelulares. Estos microorganismos que causan "*antroponosis*" han experimentado una adaptación evolutiva a la especie humana como hospedador primario y generalmente exclusivo. En cambio, las especies no humanas son el reservorio natural de los agentes infecciosos que causan "*zoonosis*" (70) (71).

El mosquito vector requiere agua para reproducirse y de una temperatura ambiente cálida para el desarrollo de las larvas y la replicación del virus. La incidencia de dengue ha aumentado significativamente en los últimos 35 años y varios factores, entre ellos la falta de servicios básicos como agua potable, drenaje y luz, la globalización y el cambio climático, han sido los principales contribuyentes. Existe una asociación entre la variabilidad del clima y el dengue. Se ha encontrado que la temperatura, las precipitaciones y la humedad están directamente asociadas con la transmisión. La temperatura influye en el ciclo de vida de los mosquitos *Aedes*, incluyendo tasa de crecimiento, la supervivencia de las larvas, huevos y la longitud del ciclo reproductivo. Se ha observado que una tasa de supervivencia de 88-93% de mosquitos se encuentra entre 20-30 °C. Este factor también afecta a la replicación del virus, la maduración y el período de infectividad. Según proyecciones para 2050 se evidenciará una potencial expansión de *Aedes aegypti* hacia el este de América del Norte, el sur de América del Sur y el este de Asia (5) (72).

#### **2.2.4 Modelos de nicho ecológico**

Los modelos ambientales (o ecológicos) de nicho son una clase de métodos que utilizan datos de ocurrencia junto con datos ambientales para hacer un modelo correlativo de las condiciones ambientales que satisfacen los requisitos ecológicos de una especie y predicen la conveniencia relativa del hábitat. Estos modelos utilizan más a menudo en una de cuatro formas: (i) estimar la idoneidad relativa del hábitat que se sabe que ocupa la especie, (ii) estimar la idoneidad relativa del hábitat en áreas geográficas que se sabe que no están ocupadas por la especie, (iii) estimar los cambios en la idoneidad del hábitat a lo largo del

tiempo dado un escenario específico de cambio ambiental, y (iv) como estimaciones del nicho de la especie (73).

El modelado de nicho ecológico se ha convertido en la principal herramienta para el modelado de distribución de especies. Se necesitan dos fuentes de entrada de datos para la generación de modelos de distribución basados en nichos, es decir, la presencia/ausencia de la especie o sólo la presencia de datos y un conjunto de variables ambientales relevantes. La pre-selección de covariables candidatas para el modelado de la distribución de las especies se debe hacer antes del modelado, por lo que es necesario realizar análisis para eliminar la autocorrelación entre covariables, y, por lo tanto, evitar la inestabilidad en el modelado (74).

Los modelos estadísticos requieren, en primer lugar, que se calcule una relación estadística (empírica) entre la actual distribución geográfica de la enfermedad y las actuales condiciones climáticas de la zona. Esto describe la influencia del clima en la distribución real de la enfermedad, según los niveles existentes de intervención humana (lucha contra enfermedades, gestión ambiental, etc.). Se aplica luego esta ecuación estadística a escenarios climáticos futuros para estimar la futura distribución real de la enfermedad, suponiendo que los niveles de intervención humana en cualquier zona climática particular no cambiarán (75).

Los modelos basados en procesos (matemáticos) utilizan ecuaciones que expresan las relaciones científicamente documentadas entre variables climáticas y parámetros biológicos (por ejemplo, la reproducción de los vectores, su supervivencia y su tasa de picadura, así como la tasa de incubación de parásitos). En sus formas más sencillas, estos modelos expresan mediante un conjunto de ecuaciones cómo afectaría una configuración determinada de variables climáticas a la biología de vectores y parásitos y, por consiguiente, a la transmisión de enfermedades (70).

Actualmente se han utilizado diversos modelos matemáticos para facilitar la comprensión de las complejas interacciones entre las poblaciones de vectores y sus hospederos. La simulación de escenarios permite el estudio de hipótesis generadas en la investigación de campo y da una idea de las observaciones empíricas aparentemente contraintuitivas o contrastantes. Estos modelos permiten, a través de la identificación y evaluación de los parámetros clave en la transmisión, sintetizar el conocimiento actual para indicar las prioridades en las investigaciones y perspectivas futuras (76).

Con la finalidad de identificar el conjunto de factores ambientales que explican la distribución actual de los vectores se han utilizado modelos fenomenológicos, los cuales suponen que las condiciones climáticas representan todo el hábitat adecuado en donde los vectores pueden desarrollarse. Posteriormente, este conjunto de condiciones permite estimar las futuras distribuciones del vector o de la enfermedad. Los modelos mecanicistas, por su parte, tienen la ventaja de ser capaces de proyectar mecanismos biológicos, a diferencia de las simples asociaciones. La enorme cantidad de parámetros climáticos y demográficos relacionados con las variables de respuesta y de comportamiento plantean enormes desafíos para la construcción y la comprensión de las ETV. Los modelos mecanicistas consisten en desmenuzar los fenómenos complejos en partes, para comprender, desde las propiedades de las mismas, el funcionamiento del todo. La mayoría de los modelos mecanicistas, por tanto, permiten conocer los principales factores que se creen dominantes (76) (77).

Otros modelos, de reciente uso, son los de la matriz de la próxima generación, los cuales han resultado ser una sencilla forma de evaluar la sensibilidad, o el riesgo, de una población. El enfoque de estos modelos es obtener simulaciones a partir del número de casos de individuos infectados en una población totalmente susceptible ( $R_0$ ), posteriormente se puede determinar la tendencia lineal a partir de parámetros extraídos de la literatura, ya sean antecedentes, actuales o predicciones. Los modelos de matriz de la próxima generación han sido epidemiológicamente útiles para determinar la tasa y persistencia de infección, así como el éxito que pueden tener algunos vectores para invadir y/o propagarse (75).

#### *A. Modelo de nicho ecológico en Maxent*

Una vez conocidos todos los datos de entrada de Maxent sólo queda ejecutarlo para obtener las distribuciones de las especies y el impacto del cambio climático sobre ellas. En la figura 9 se muestra el aspecto de la interfaz y los parámetros de ejecución del proceso; 1) cuadro de diálogo de la muestra de presencias de la especie, 2) elección de las 19 variables climáticas sin correlación, sin colinearidad y máxima devianza explicada, 3) elección del formato de datos logístico, ya que mejora la calibración del modelo, de este modo, los valores de salida más diferentes se corresponden mejor con grandes diferencias de idoneidad (Phillips y Dudík, 2008), 4) directorios de salida y proyecciones del cambio climático, 5) selección del número de background points 6) ejecución del modelo (78).

El resultado principal de la ejecución de Maxent es un ráster que contiene valores de idoneidad de la especie en cada uno de los píxeles que lo forman. Estos datos necesitan ser

representados gráficamente en un sistema de información geográfica, de forma que se elimine la visibilidad de los píxeles con una idoneidad inferior a un umbral definido por Maxent y permanezcan los que están por encima de éste. La elección del umbral es objeto de discusión ya que hay disparidad de opiniones entre cuál sería el mejor valor de corte, para determinarlo, este estudio recopiló referencias de otros autores que plantean problemáticas parecidas, en cuanto a la metodología se refiere (78) (79).

El valor del percentil diez de las presencias de entrenamiento (10 Percentil Training Presence) significa que el 10% de los registros de cada especie con los menores valores en el modelo predicho estarán en regiones de ausencia del modelo con umbral y las regiones de presencia abarcarán el otro 90% de los registros, que tienen los valores más altos del modelo. Se optó por este umbral porque no se disponían datos de ausencia y porque ofrece un resultado ecológicamente significativo en comparación con otros valores de umbral mucho más restrictivos (49) (80).

Las capas de distribuciones resultado de Maxent se procesan en el software de Sistemas de Información Geográfica ArcGIS para su representación gráfica. Todos los conjuntos de datos geográficos tienen un sistema de coordenadas que se usa a través de ArcGIS para mostrar, medir y transformar los datos. Los ráster resultantes de Maxent tienen un sistema de referencia de coordenadas desconocido por lo que es necesario definirlo para poder aplicar los umbrales de presencia/ausencia y cambiar sus valores decimales para hacerlos más legibles. Con la herramienta Define Projection se consigue adecuar los datos a un marco geográfico. Con Ráster Calculator se utiliza Set Null para establecer nulos los valores por debajo del umbral acordado y posteriormente multiplicarlos por cien y redondearlos, iterando el proceso para todos los ráster susceptibles de esta operación (79).

## **2.3 Marco referencial**

### **2.3.1 Predicción de posibles rangos de vectores primarios de malaria y malaria en el norte de América del Sur en función de los cambios proyectados en el clima, la cobertura del suelo y la población humana (2015).**

Empleando registros solo de presencia, datos bioclimáticos, topográficos, hidrológicos, LULC y de población humana, modelamos la distribución de la malaria y dos de sus vectores dominantes, *Anopheles darlingi* y *Anopheles nuneztovari* sl en el norte de América del Sur utilizando la plataforma de modelado de distribución de especies Maxent.

Los resultados de nuestro modelo de cambio de tierra indican que alrededor de 70,000 km<sup>2</sup> de tierra forestal se perderían para 2050 y 78,000 km<sup>2</sup> para 2070 en comparación con 2010. El modelo Maxent predijo zonas de idoneidad de hábitat relativamente alta para la malaria y los vectores principalmente dentro del Amazonas y a lo largo de las costas. Si bien se espera que las áreas con malaria disminuyan de acuerdo con las tendencias descendentes actuales, se pronostica que ambos vectores experimentarán expansiones de rango en el futuro. La elevación, la precipitación anual y la temperatura influyeron en todos los modelos, tanto actuales como futuros. La población humana mayormente afectada An. distribución de *darlingi* mientras que los cambios de LULC influyeron en An. distribución *nuneztovari* sl (81).

Se concluye que a medida que la región aborda el desafío de la eliminación de la malaria, investigaciones como esta podrían ser útiles para fines de planificación y gestión y ayudar a predecir y abordar posibles impedimentos para la eliminación (81).

### **2.3.2 Cambios geográficos en la idoneidad del hábitat de *Aedes aegypti* en Ecuador utilizando datos de vigilancia de larvas y modelos de nicho ecológico: implicaciones del cambio climático para el control de vectores de salud pública (2019).**

Empleando un conjunto de datos único de registros de ocurrencia de larvas proporcionados por el Ministerio de Salud ecuatoriano, utilizamos modelos de nicho ecológico (ENM) para estimar la distribución geográfica actual de *Aedes aegypti* en Ecuador, utilizando la presencia de mosquitos como un indicador indirecto del riesgo de transmisión de enfermedades. Los ENM construidos con el algoritmo de algoritmo genético para la producción de conjuntos de reglas (GARP) y un conjunto de variables ambientales se

evaluaron para determinar su acuerdo y precisión. El modelo superior de presencia de mosquitos larvarios se proyectó para el año 2050 bajo varias combinaciones de escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero y modelos de cambio climático (82).

Bajo las condiciones climáticas actuales, no se predijeron los mosquitos larvarios en áreas de alta elevación en Ecuador, como la cordillera de los Andes, así como en la parte oriental de la cuenca del Amazonas. Sin embargo, todos los modelos proyectados para escenarios de cambio climático futuro demostraron cambios potenciales en la distribución de mosquitos, en los que se observaron contracciones en el rango en la mayor parte del este de Ecuador, y las áreas de elevación de transición se volvieron adecuadas para la presencia de mosquitos. Invasión de *Ae. Se estimó que aegypti* en terreno montañoso afectaría hasta 4.215 km<sup>2</sup> en el escenario más extremo del cambio climático, un área que pondría en riesgo a más de 12,000 personas que viven actualmente en áreas de transición. Este cambio distributivo hacia comunidades en elevaciones más altas indica un área de preocupación para las agencias de salud pública, ya que pueden ser necesarias intervenciones específicas para proteger a las poblaciones vulnerables con exposición previa limitada a enfermedades transmitidas por mosquitos. En última instancia, los resultados de este estudio sirven como una herramienta para informar las políticas de salud pública y las estrategias de reducción de mosquitos en Ecuador (82).

### **2.3.3 Disminución de la prevalencia de vectores de enfermedades bajo el cambio climático (2016).**

Estimamos la distribución de 14 vectores de las enfermedades transmitidas por vectores anteriores en climas actuales y futuros. Nuestros resultados sugieren constantemente que el calentamiento climático probablemente amenace la extinción de algunas especies de vectores, local o completamente. Estos resultados sugieren que el cambio climático podría reducir la carga de especies de vectores específicos. Es probable que otras especies de vectores cambien y limiten su rango geográfico a las tierras altas de Ecuador, lo que podría afectar a nuevas áreas y poblaciones. Estos pronósticos muestran la necesidad de desarrollar estrategias de prevención temprana para las especies de vectores actualmente ausentes en áreas proyectadas como adecuadas en condiciones climáticas futuras. Las intervenciones informadas podrían reducir el riesgo de exposición humana a especies de vectores con cambios de distribución, en respuesta a los cambios climáticos actuales y futuros. Con base en los efectos mixtos del clima futuro sobre la exposición humana a los vectores de

enfermedades, argumentamos que la investigación sobre enfermedades transmitidas por vectores debe ser a escala cruzada e incluir factores climáticos, demográficos y paisajísticos, así como fuerzas que faciliten la transmisión de enfermedades a escalas finas (83).

#### **2.3.4 Predicción de la distribución del vector de la malaria en escenarios de cambio climático en China: Desafíos para la eliminación del paludismo.**

Aquí evaluamos el impacto potencial del cambio climático sobre cuatro vectores dominantes de la malaria (*An. dirus*, *An. minimus*, *An. lesteri* y *An. sinensis*) utilizando modelos de distribución de especies para dos décadas futuras: los años 2030 y 2050. Las estimaciones basadas en simulaciones sugieren que el área ambientalmente adecuada (AMA) para *An. dirus* y *An. minimus* aumentaría en un promedio de 49% y 16%, respectivamente, bajo los tres escenarios para los años 2030, pero disminuiría en un 11% y 16%, respectivamente, en los años 2050. En contraste, un aumento de 36% y 11%, respectivamente, en el ESA de *An. lesteri* y *An. sinensis*, se estimó bajo escenarios de emisiones de estabilización media (RCP4.5) y muy fuertes (RCP8.5) en los años 2050. En total, se prevé un aumento neto sustancial en la población expuesta a los cuatro vectores dominantes de la malaria en las décadas de 2030 y 2050, considerando simultáneamente los cambios en el uso de la tierra y la urbanización. Las estrategias para lograr y mantener la eliminación del paludismo en China deberán tener en cuenta estos posibles cambios en la distribución y receptividad de los vectores (84).

#### **2.3.5 Expansión global y redistribución del riesgo de transmisión del virus transmitido por *Aedes* con el cambio climático.**

Se aplicó un modelo de transmisión viral parametrizado empíricamente por los vectores *Aedes aegypti* y *Aedes albopictus*, en función de la temperatura, para predecir el riesgo de transmisión global mensual acumulado en los climas actuales, y compararlos con el riesgo proyectado en 2050 y 2080 según los modelos de circulación general (MCG). Nuestros resultados muestran que si los cambios en el rango de mosquitos rastrean los rangos óptimos de temperatura para la transmisión (21.3–34.0 °C para *Ae. Aegypti*; 19.9–29.4 °C para *Ae. Albopictus*), podemos esperar cambios hacia los polos en las distribuciones de virus transmitidas por *Aedes*. Sin embargo, los diferentes nichos térmicos de los dos vectores producen diferentes patrones de cambios bajo el cambio climático. Los escenarios de cambio climático más severos producen una mayor exposición de la población a la transmisión por *Ae. aegypti*, pero no por *Ae. albopictus* en los casos más extremos. El riesgo

de transmisión provocado por el clima de ambos mosquitos aumentará sustancialmente, incluso a corto plazo, para la mayor parte de Europa. En contraste, se esperan reducciones significativas en la idoneidad climática para *Ae. albopictus*, más notablemente en el sudeste de Asia y África occidental. En el próximo siglo, casi mil millones de personas están amenazadas con una nueva exposición a la transmisión del virus por ambas *Aedes* spp en el peor de los casos. Como se prevén pérdidas netas importantes en el riesgo de transmisión durante todo el año para *Ae albopictus*, proyectamos un cambio global hacia un mayor riesgo estacional en todas las regiones. Existen muchos otros factores complicados (como los límites de rango de mosquitos y la evolución viral), pero en general nuestros resultados indican que, si bien el cambio climático conducirá a una mayor exposición neta y nueva a los virus transmitidos por *Aedes*, los aumentos más extremos de *Aedes*. Se predice que la transmisión albopictus ocurrirá en escenarios intermedios de cambio climático (85).

### **2.3.6 Impacto potencial del cambio climático en la distribución geográfica de dos vectores silvestres de la enfermedad de Chagas en Chile: *Mepraia spinolai* y *Mepraia gajardoi***

El objetivo de este estudio fue estimar la distribución geográfica potencial de *M. spinolai* y *M. gajardoi* bajo escenarios climáticos actuales y futuros. Utilizamos el algoritmo Maxent para modelar el nicho ecológico de *M. spinolai* y *M. gajardoi*, estimando sus distribuciones potenciales a partir de la información climática actual y proyectando sus distribuciones a condiciones climáticas futuras bajo escenarios de vías de concentración representativas (RCP) 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5. Las predicciones futuras de idoneidad se construyeron teniendo en cuenta las situaciones de mayor y menor riesgo para la salud pública. Las actuales distribuciones potenciales de ambas especies eran más amplias que sus áreas de distribución conocidas. Para ambas especies, las proyecciones de cambio climático para 2070 en los escenarios 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5 del PCR mostraron resultados diferentes dependiendo de la metodología utilizada. La situación de mayor riesgo mostró nuevas áreas adecuadas, pero la situación de menor riesgo modeló una reducción neta en las futuras áreas potenciales de distribución de *M. spinolai* y *M. gajardoi*. Las áreas adecuadas para ambas especies pueden ser mayores de lo que se conoce actualmente, lo que genera nuevos desafíos en términos de control y prevención de vectores. Bajo condiciones climáticas futuras, estas especies podrían modificar su área de distribución geográfica potencial. Las medidas preventivas para evitar la transmisión vectorial humana accidental por vectores silvestres de *T. cruzi* se vuelven

críticas considerando la incertidumbre de las futuras áreas adecuadas proyectadas en este estudio (86).

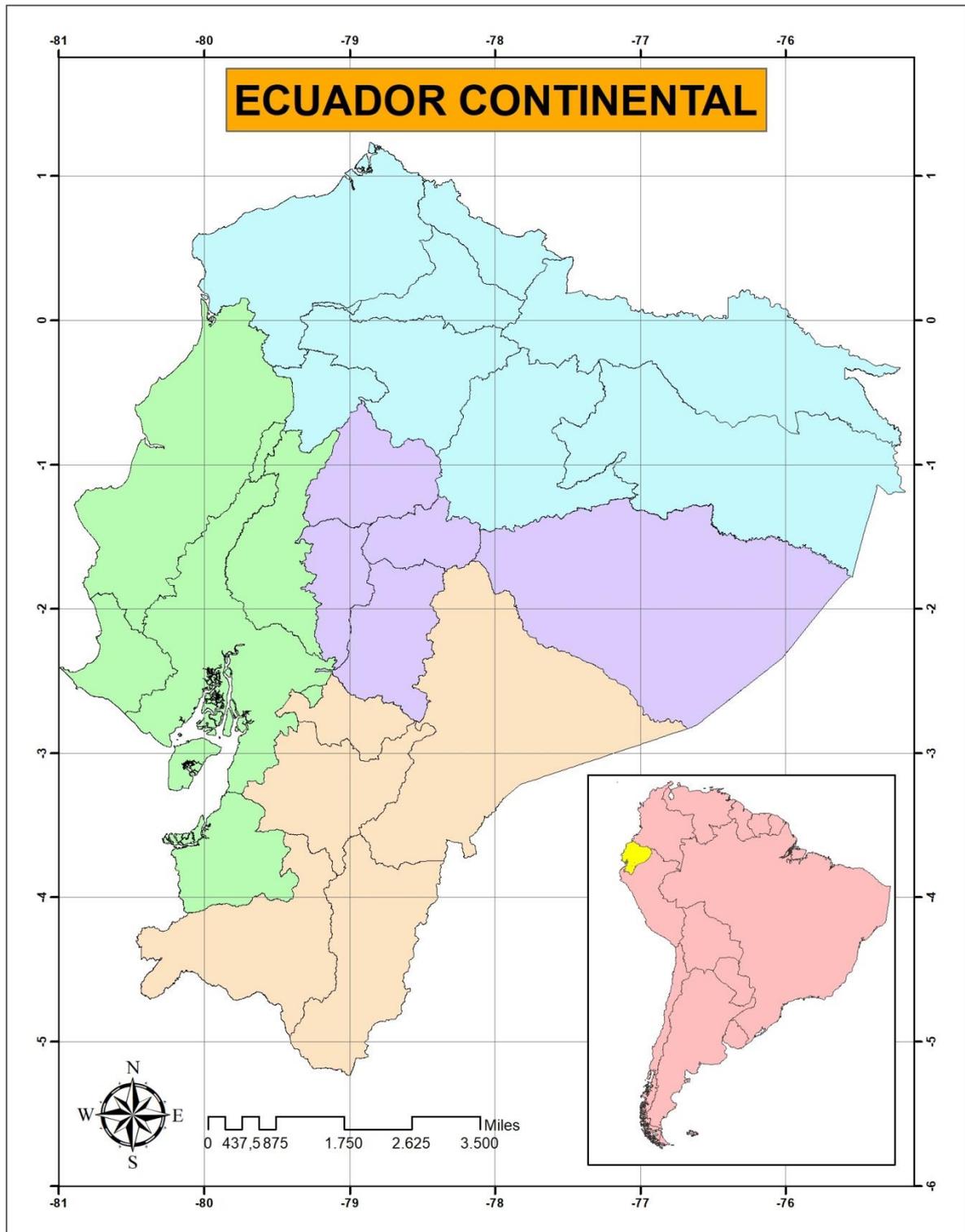
### **2.3.7 Los efectos del cambio climático mundial en la vulnerabilidad de Venezuela a la enfermedad de Chagas están relacionados con la distribución geográfica de cinco especies de triatomíneos.**

Analizamos los posibles efectos del cambio climático global sobre la posible distribución geográfica en Venezuela de cinco especies de triatomíneos, vectores de *Trypanosoma cruzi*, agente etiológico de la enfermedad de Chagas. Para obtener las futuras distribuciones geográficas potenciales, expresadas como adecuación de nichos climáticos, se modelaron las presencias de estas especies utilizando dos escenarios de emisiones futuras de cambio climático global (A1B y B1) del IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático), el modelo de Clima Global CSIRO Mark 3.0, y tres períodos de proyecciones futuras (años 2020, 2060, y 2080). Luego de estimar con el software MaxEnt la idoneidad climática futura para cada especie, escenario y período de proyecciones futuras, estimamos una serie de índices de vulnerabilidad de Venezuela a nivel de país, estado y provincia, medidos como el número de personas expuestas debido a los cambios en la distribución geográfica de las cinco especies de *triatominos* analizadas. A pesar de que esto no es una medida del riesgo de transmisión de la enfermedad de Chagas, concluimos que los posibles efectos futuros del cambio climático global sobre la vulnerabilidad de la población venezolana muestran una tendencia ligeramente decreciente, incluso teniendo en cuenta el crecimiento futuro de la población; podemos esperar menos lugares en Venezuela donde un ciudadano venezolano promedio estaría expuesto a los triatomíneos en los próximos 50-70 años (87).

## **CAPÍTULO III. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

### 3.1 Localización

El estudio se desarrolló en el área continental de Ecuador, situado en la costa noroccidental de América del Sur, entre los paralelos  $01^{\circ}30' N$  y  $03^{\circ}23.5' S$  y los meridianos  $75^{\circ}12' W$  y  $81^{\circ}00' W$ , con una extensión territorial de 256.370 km<sup>2</sup> (Ilustración 1).



**Fuente:** Elaborado en base a insumos cartográficos de IGM (2008), SENPLADES (2015).

**Ilustración 1.** Mapa de localización geográfica del Ecuador continental.

## **3.2 Tipo de investigación**

### **3.2.1 Exploratoria**

El estudio reúne las cualidades de una investigación de tipo exploratoria debido a que permitió realizar un primer acercamiento respecto a la problemática de los vectores de enfermedades, a través de la modelación espacial de la distribución geográfica actual y futura de dichas especies en el Ecuador continental.

## **3.3 Métodos de investigación**

### **3.3.1 Analítico**

En la investigación en mención se utilizó ampliamente este método para el análisis de los registros de datos de las especies exóticas de vectores de enfermedades y el posterior planteamiento y validación de modelos predictivos.

## **3.4 Fuentes de recopilación de información**

### **3.4.1 Primarias**

Estas fuentes de información están integradas por los artículos científicos (investigación y revisión) y libros referidos en el presente documento, a partir de los cuales se extrajo datos cualitativos y cuantitativos inherentes a la temática inquirida. Las fuentes primarias incluyeron información de carácter científico sobre distribución de especies, nicho ecológico, variables bioclimáticas, cambio climático, entre otros aspectos.

### **3.4.2 Secundarias**

Se extrajo datos de presencia de las especies de vectores estudiados (*Aedes aegypti*, *Simulium damnosus* y *Tripanosoma cruzi*) de la base de datos Global Biodiversity Information Facility (<https://www.gbif.org/es/>) (57), con un total de 50 puntos de presencia para el área del Ecuador continental, distribuidos de la siguiente manera: *A. aegypti* (33 puntos), *S. damnosus* (11 puntos) y *T. cruzi* (6 puntos). Tales registros incluyeron la localización geográfica invasiva de dichas especies de insectos, con sus respectivas coordenadas.

Las 19 variables bioclimáticas de World Clim versión 1.4 (~1960-1990) para el escenario presente fueron descargadas del sitio oficial de WorldClim (<https://www.worldclim.org>) en

formato Tiff (para uso en ArcGis) y Ascii (para uso en Maxent) con una resolución de 30 arc-seconds (~1 km) para el área del ecuador continental. Estas mismas variables fueron descargadas para dos escenarios futuros (RCP45 y RCP85) para los años 2050 y 2070 desde el *Coupled Model Intercomparison Project* del sitio web WorldClim ([http://www.worldclim.org/cmip5\\_2.5m](http://www.worldclim.org/cmip5_2.5m)) (55) (57).

### 3.5 Diseño de la investigación

#### 3.5.1 Selección de especies vectores de enfermedades

La selección de las especies exóticas de vectores de enfermedades se la realizó a través del informe de Enfermedades Tropicales de la OMS (31) (34). Para determinar las características ambientales de las especies exóticas de vectores (Tabla 1) se extrajeron registros de presencia georreferenciados del área de invasión de las especies en la base de datos Global Biodiversity Information Facility (<https://www.gbif.org/es/>), debidamente certificados por colecciones de centros de investigación. Posteriormente, con los registros de presencia de las tres especies se aplicaron filtros espaciales y temporales en la plataforma NicheToolBox (<http://shiny.conabio.gob.mx:3838/nichetoolb2/>), a fin de eliminar los registros de presencia duplicados dentro de un radio de 1 km<sup>2</sup> para la zona del ecuador continental, y se eligieron aquellos registros de presencia que coincidían temporalmente con las variables ambientales de World Clim versión 1.4 (<https://www.worldclim.org>) (12) (48).

Tabla 1. Lista de especie potencialmente invasoras

| Especie                  | Nombre común        | Nativa de:      | Tipo de especie | Puntos de presencia |
|--------------------------|---------------------|-----------------|-----------------|---------------------|
| <i>Aedes aegypti</i>     | Mosquito            | África          | Insecto         | 33                  |
| <i>Simulium damnosus</i> | Mosca negra         | África          | Insecto         | 11                  |
| <i>Tripanosoma cruzi</i> | Chinche de triatoma | América del Sur | Insecto         | 6                   |

Se definió el área de accesibilidad de acuerdo a los registros de presencia en la región de invasión de acuerdo a los criterios de climatología y barreras físicas (ríos, montañas, desiertos, entre otros) de la especie, con ayuda de la información bibliográfica obtenida de artículos científicos y la historia filogenética de la especie.

### 3.5.2 Obtención de Variables bioclimáticas de World Clim 1.4 para el Ecuador continental

Las 19 variables bioclimáticas de World Clim 1.4 a resolución de 30 arc-segundos (1km<sup>2</sup>) fueron extraídas del sitio web oficial (<https://www.worldclim.org/>) en formato de imágenes de mapas bits y/o ráster (Tiff) (25), con cobertura temporal de 1961-1990 para el presente (12) (48). Las capas ráster de dichas variables climáticas fueron recortadas para el área del Ecuador continental mediante el uso de la función *extraction by mask* en la aplicación ArcMap de ArcGIS 10.3 y exportadas en formato de código de caracteres (Ascii) mediante la función *ráster to ascii*. Para la modelación a futuro se trabajó con las mismas 19 variables en escenarios de cambio climáticos RCP45 (Trayectorias de Concentración Representativas Estables de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero) y RCP85 (Trayectorias de Concentración Representativas Crecientes de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero) para el periodo de tiempo 2050 y 2070, a las cuales se les aplicó el mismo procedimiento de extracción, recorte y conversión (88).

Tabla 2. Variables bioclimáticas de WorldClim 1.4.

| Variable | Significado   |
|----------|---|
| BIO 01   | Temperatura promedio anual  |
| BIO 02   | Rango diurno promedio (promedio mensual, temperatura máxima – temperatura mínima) |
| BIO 03   | Isotermalidad (BIO2 / BIO7) (* 100)   |
| BIO 04   | Temperatura estacional (desviación estándar * 100)                                |
| BIO 05   | Temperatura máxima del mes más caliente   |
| BIO 06   | Temperatura mínima del mes más frío   |
| BIO 07   | Rango de temperatura anual (BIO5-BIO6)  |
| BIO 08   | Temperatura promedio del trimestre más húmedo                                     |
| BIO 09   | Temperatura promedio del trimestre más seco                                       |
| BIO 10   | Temperatura promedio del trimestre más caliente                                   |
| BIO 11   | Temperatura promedio del trimestre más frío                                       |
| BIO 12   | Precipitación anual   |
| BIO 13   | Precipitación del mes más húmedo  |
| BIO 14   | Precipitación del mes más seco  |
| BIO 15   | Precipitación estacional (coeficiente de variación)                               |
| BIO 16   | Precipitación en el trimestre más húmedo  |
| BIO 17   | Precipitación en el trimestre más seco  |
| BIO 18   | Precipitación en el trimestre más caliente  |
| BIO 19   | Precipitación en el trimestre más frío  |

Fuente: WorldClim 1.4 – Global Climate Data (2005)

**BIO 01 - Temperatura promedio anual:** o también conocida como temperatura media anual, es el valor de temperatura obtenido a partir del promedio de las temperaturas medias registradas en cada uno de los doce meses del año. Su distribución, es muy irregular, y se encuentra estrechamente vinculada a la configuración del relieve (89).

**BIO 02 - Rango diurno promedio (promedio mensual, temperatura máxima – temperatura mínima):** la media de la temperatura mensual (máximo mensual menos el mínimo mensual). Dado que las entradas de datos climáticos son mensuales o promediadas en meses a lo largo de varios años, este cálculo utiliza la fluctuación de temperatura registrada en un mes para capturar el rango de temperatura diurna. Uso mensual los promedios de esta manera son matemáticamente equivalentes para calcular el rango de temperatura para cada día en un mes, y promediando estos valores para el mes (90).

**BIO 03 - Isotermalidad (BIO2 / BIO7) (\* 100):** la isoterma cuantifica el tamaño de las oscilaciones de las temperaturas entre el día y la noche en relación con las oscilaciones entre el verano y el invierno (anuales) (90).

**BIO 04 - Temperatura estacional (desviación estándar \* 100):** es el coeficiente de variación de temperatura (C de V) es la desviación estándar de las temperaturas medias mensuales expresadas como un porcentaje de la media de esas temperaturas (es decir, la media anual). Para este cálculo, se utiliza la media en grados Kelvin. Esto evita la posibilidad de tener que dividir por cero, pero sí significa que los valores suelen ser bastante pequeños (89).

**BIO 05 - Temperatura máxima del mes más caliente:** la ocurrencia máxima de la temperatura mensual durante un año determinado (series temporales) o el período medio de años (normal) (90).

**BIO 06 - Temperatura mínima del mes más frío:** la aparición de la temperatura mínima mensual a lo largo de un año determinado (series cronológicas) o el período medio de tiempo de años (normal) (92).

**BIO 07 - Rango de temperatura anual (BIO5-BIO6):** diferencia entre la temperatura máxima del período más cálido y la temperatura mínima del período más frío (90).

**BIO 08 - Temperatura promedio del trimestre más húmedo:** este índice trimestral aproxima la media de temperaturas que prevalecen durante la estación más lluviosa (92).

**BIO 09 - Temperatura promedio del trimestre más seco:** este índice trimestral aproxima la media de temperaturas que prevalecen durante el trimestre más seco (92).

**BIO 10 - Temperatura promedio del trimestre más caliente:** este índice trimestral aproxima la media de temperaturas que prevalecen durante el trimestre más cálido (92).

**BIO 11 - Temperatura promedio del trimestre más frío:** se determina el trimestre más frío del año (al mes más cercano) y se calcula la temperatura media de este período (89).

**BIO 12 - Precipitación anual:** consiste en la suma de todas las estimaciones mensuales de precipitación (90).

**BIO 13 - Precipitación del mes más húmedo:** consiste en obtener la precipitación del mes más húmedo (92).

**BIO 14 - Precipitación del mes más seco:** es la precipitación del mes más seco (90).

**BIO 15 - Precipitación estacional (coeficiente de variación):** esta es una medida de la variación en la precipitación mensual totaliza a lo largo del año. Este índice es el cociente de la desviación estándar de la precipitación total mensual hasta el total mensual medio precipitación (coeficiente de variación) y se expresa como porcentaje (90).

**BIO 16 - Precipitación en el trimestre más húmedo:** se determina el trimestre más lluvioso del año (al mes más cercano) y se calcula la precipitación total durante este período (90).

**BIO 17 - Precipitación en el trimestre más seco:** se determina el trimestre más seco del año (al mes más cercano) y se calcula la precipitación total durante este período.

**BIO 18 - Precipitación en el trimestre más caliente:** se determina el trimestre más cálido del año (al mes más cercano) y se calcula la precipitación total durante este período (90).

**BIO 19 -Precipitación en el trimestre más frío:** Se determina el trimestre más frío del año (al mes más cercano) y se calcula la precipitación total durante este período (90).

### **3.5.3 Modelación de nicho ecológico**

La modelación espacial de la distribución geográfica de las especies de vectores se la efectuó en el software Maxent 3.2.0 mediante la aplicación del algoritmo de Máxima Entropía Maxent 3.3k (49) para el territorio del Ecuador continental. Una vez aplicado el análisis de correlaciones de Pearson para identificar las variables más correlacionadas ( $>0.70$ ), luego se

aplicará un análisis *Jackknife* para identificar las variables de mayor aporte y contribución al modelo. Posteriormente se extrajo la información climática de cada punto de presencia de las especies de vectores mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica (ArcGIS 10.3). Para validar los modelos se utilizó la plataforma NicheToolBox (<http://shiny.conabio.gob.mx:3838/nichetoolb2/>), la cual presento métricas de rendimiento del modelo como AUC, Roc Parcial mediante la comparación de un modelo al azar (no predictivo) y los modelos resultantes del algoritmo Maxent.

El modelo de distribución potencial de las especies exóticas de vectores transmisoras de enfermedades hacia el futuro, fue calibrado con las variables ambientales de mayor importancia (contribución y aporte al modelo) y de menor correlación. Las variables de los escenarios RCP45 y RCP85 fueron proyectadas al área de Ecuador continental mediante la aplicación del algoritmo de máxima entropía Maxent 3.3k (26), de la misma manera, para la validación de los modelos se aplicó las pruebas de AUC y Roc Parcial mediante la comparación de un modelo no predictivo con los modelos resultantes de Maxent a través de la plataforma NicheToolBox respectivamente.

### 3.6 Recursos humanos y materiales

La investigación demandó el uso de diversos recursos humanos y materiales (Tabla 3).

**Tabla 3. Recursos humanos y materiales utilizados en la investigación.**

|   |
|---|
| <b>Recurso humano</b>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Estudiante investigador</li> <li>• Tutor de investigación</li> </ul>                                       |
| <b>Materiales de oficina</b>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bolígrafos</li> <li>• Cuaderno de apuntes</li> <li>• Útiles de oficina</li> </ul>                          |
| <b>Software</b>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hoja de cálculo de Excel</li> <li>• ArcGIS 10.3</li> <li>• Maxent 3.4.1</li> <li>• NicheToolBox</li> </ul> |
| <b>Equipos</b>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ordenador</li> <li>• Impresora</li> </ul>  |

## **CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

## 4.1 Resultados

### 4.1.1 Distribución geográfica del potencial de especies vectores en Ecuador durante el periodo 2019.

#### 4.1.1.1 *Aedes aegypti*

El reporte de presencia de *Aedes aegypti* (mosquito del dengue) para el territorio del Ecuador continental, muestra una distribución geográfica mayoritaria de la especie en la circunscripción provincial de Guayas y Orellana. También se exhibe una presencia minoritaria de *A. aegypti* en las provincias de Manabí, Esmeraldas, Sto. Domingo, Carchi, Tungurahua, Azuay, Zamora Chinchipe y Loja (Ilustración 2).

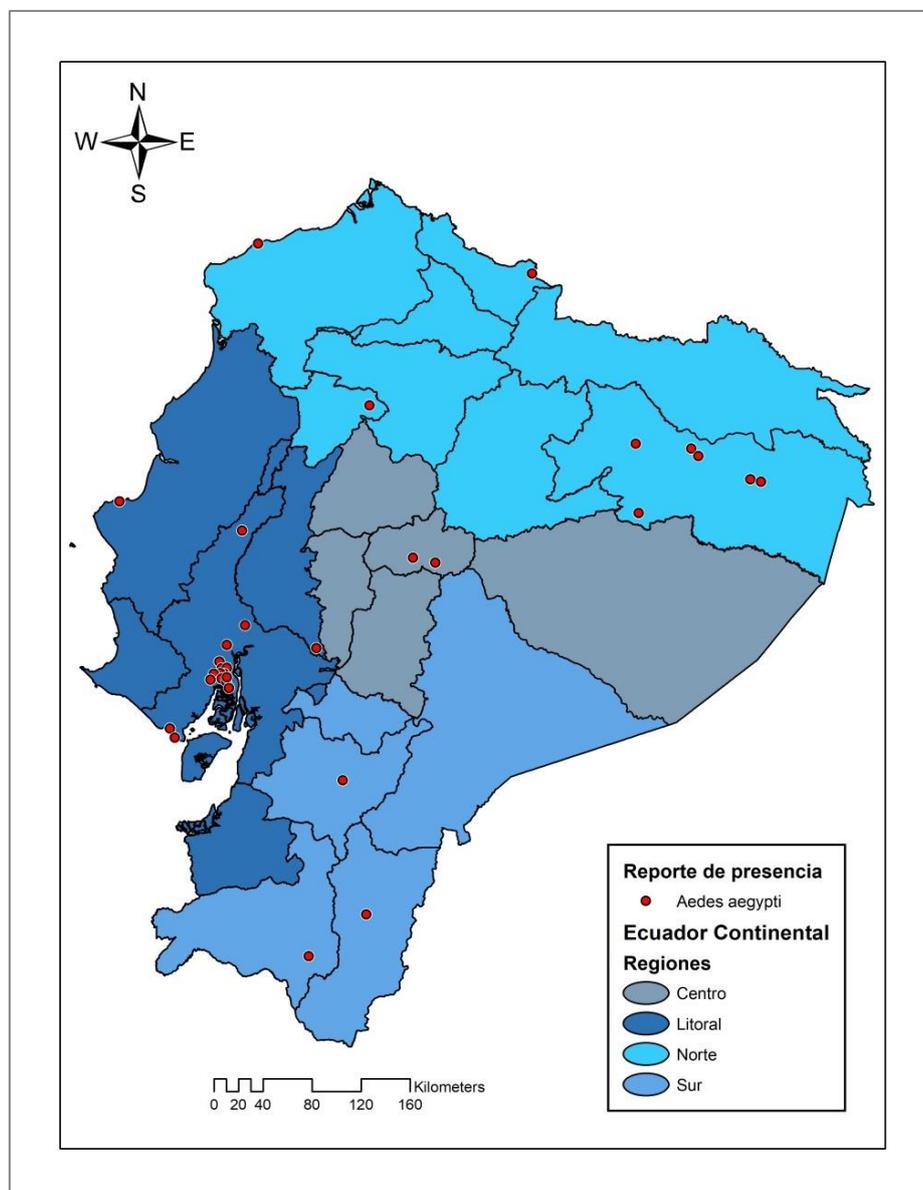


Ilustración 2. Registro de presencia de *Aedes aegypti* en Ecuador continental.

El escenario actual para la especie *Aedes aegypti* muestra que en la zona occidental del Ecuador continental (Guayas, Machala, Esmeraldas, Manabí y Santa Elena) coexisten las condiciones ambientales favorables para el desarrollo de la especie, siendo las zonas de color rojo intenso aquellas con alta probabilidad de condiciones idóneas (49.595 km<sup>2</sup>) y las áreas de color amarillo-rojizo / amarillo-verdoso como zonas de mediana probabilidad (80.455 km<sup>2</sup>). Asimismo, se evidencia que el área meridional y oriental del país (color verde) ostentan una baja probabilidad de desarrollo de *A. aegypti* (118.420 km<sup>2</sup>) (Ilustración 3).

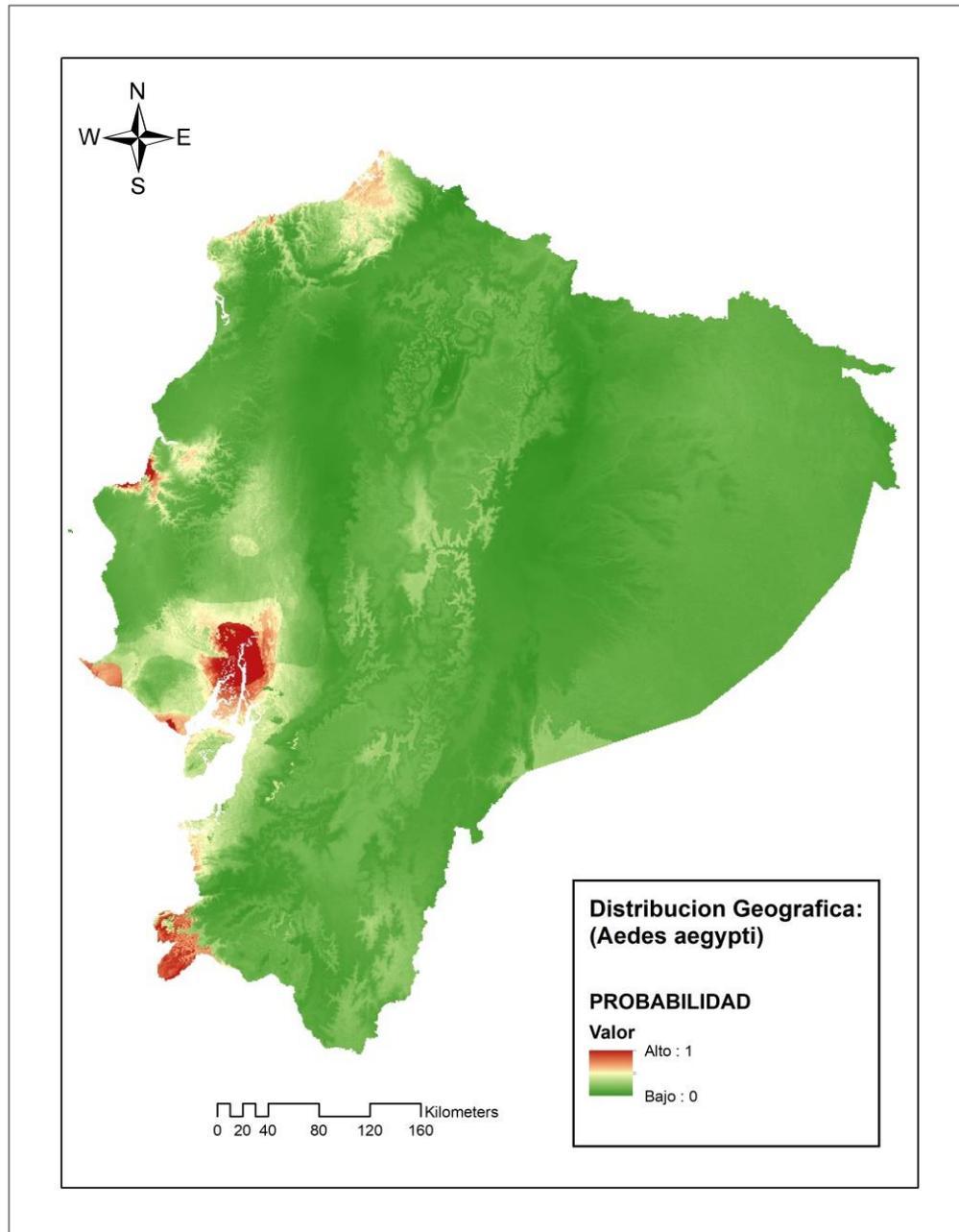


Ilustración 3. Escenario actual de distribución geográfica de *Aedes aegypti*.

Las variables bio14 (precipitación del mes más seco) y bio8 (temperatura promedio del trimestre más húmedo) se encuentran altamente correlacionadas, debido a que ostentan un valor de contribución al modelo de 63,1% y 26,5% respectivamente. La antes mencionada bio14 es la variable bioclimática de mayor importancia para el modelo de distribución geográfica actual de la especie *Aedes aegypti*, debido a que evidencia una mayor ganancia cuando se utiliza aisladamente de las otras variables, es decir, que contiene información más útil por sí misma. Asimismo, se observa que la bio14 es la variable ambiental que mayormente declina la ganancia cuando se omite, que por tanto parece tener la mayor cantidad de información que no está presente en las otras variables utilizadas en el modelo (Ilustración 4).

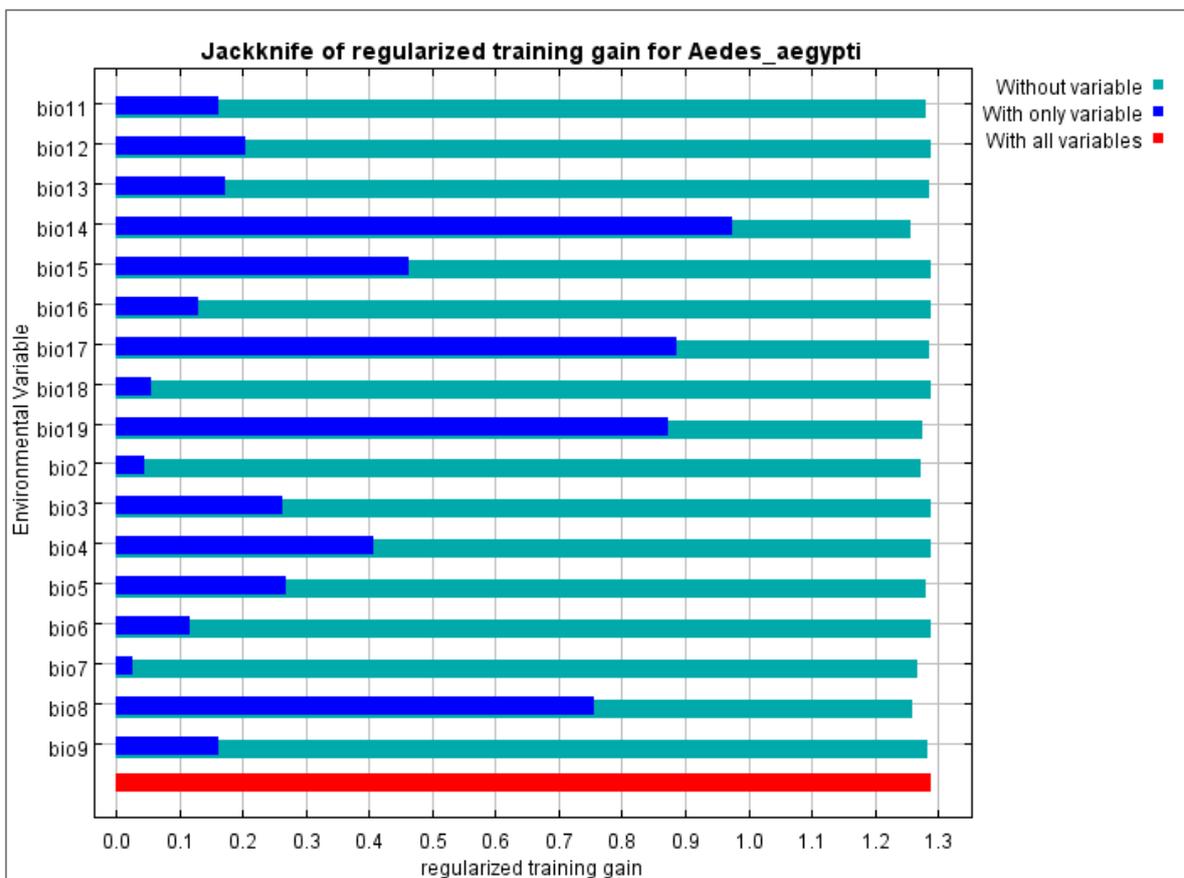


Ilustración 4. Prueba de jackknife para las variables bioclimáticas utilizadas en el modelo actual de distribución geográfica de *Aedes aegypti*.

#### 4.1.1.2 *Simulium damnosus*

La distribución geográfica de la especie *Simulium damnosus* (mosca negra) en el Ecuador continental se concentra en las provincias de Carchi, Cotopaxi y Chimborazo, pertenecientes a la región sierra, y en los territorios amazónicos de las provincias de Napo y Morona Santiago, siendo Napo la provincia con mayor presencia de *S. damnosus* (Ilustración 5).

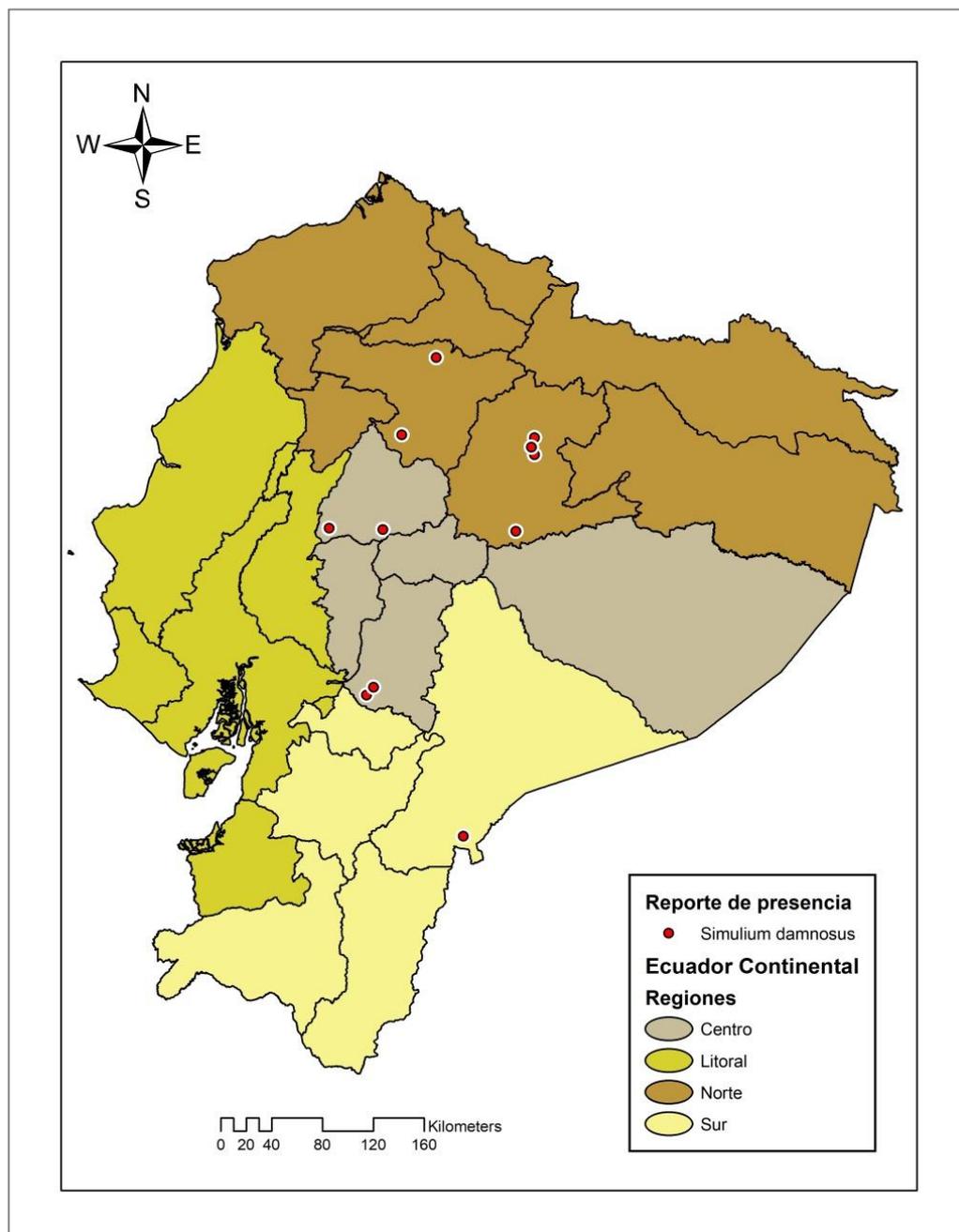


Ilustración 5. Registro de presencia de *Simulium damnosus* en Ecuador continental.

En el escenario presente para la especie *Simulium damnosus* se evidencia que la zona céntrica del país, ocupada por la cordillera de los Andes (61.496 km<sup>2</sup>), cuenta con las condiciones ambientales idóneas para el desarrollo de *S. damnosus*, lo cual la convierte en un territorio con alta probabilidad de presencia de la especie dentro del escenario actual. Igualmente se observa que la zona occidental (región costa) dispone de una probabilidad media (82.442 km<sup>2</sup>), y el oriente del país (Amazonía) muestra zonas con baja y nula probabilidad (104.532 km<sup>2</sup>) de ocurrencia de *S. damnosus* (Ilustración 6).

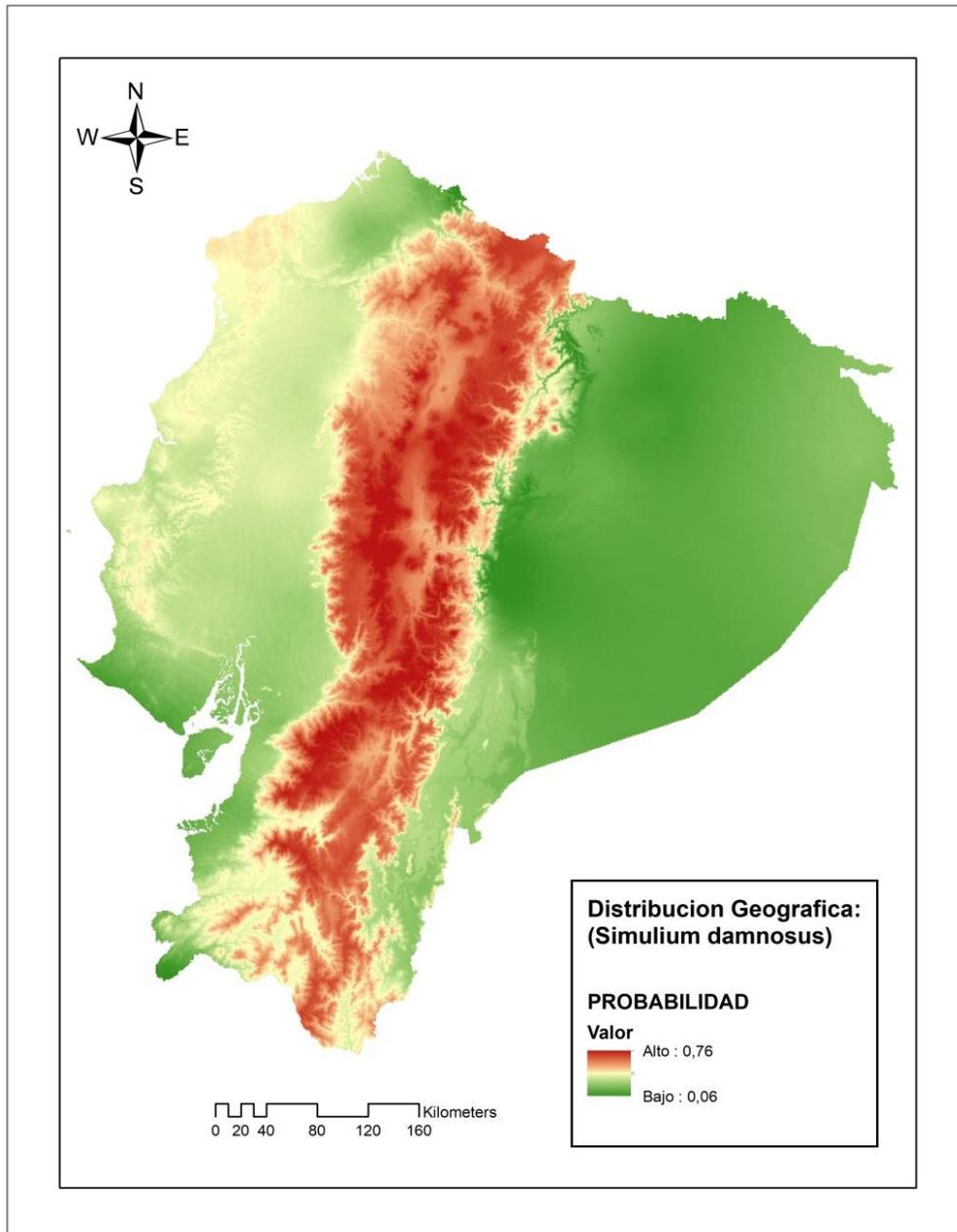


Ilustración 6. Escenario actual de distribución geográfica de *Simulium damnosus*.

Las variables bio9 (temperatura promedio del trimestre más seco) y bio17 (precipitación en el trimestre más seco) evidencian una alta correlación, con valores de contribución al modelo de 74,2% y 13,8% correspondientemente. Asimismo, se observa que la variable ambiental con mayor ganancia cuando se utiliza aisladamente es la bio9, que por lo tanto parece tener la información más útil por sí misma. La variable ambiental que más disminuye la ganancia cuando se omite es la bio17, que por lo tanto parece tener la mayor cantidad de información que no está presente en las otras variables empleadas en el modelo de distribución geográfica de la especie *Simulium damnosus* (Ilustración 7).

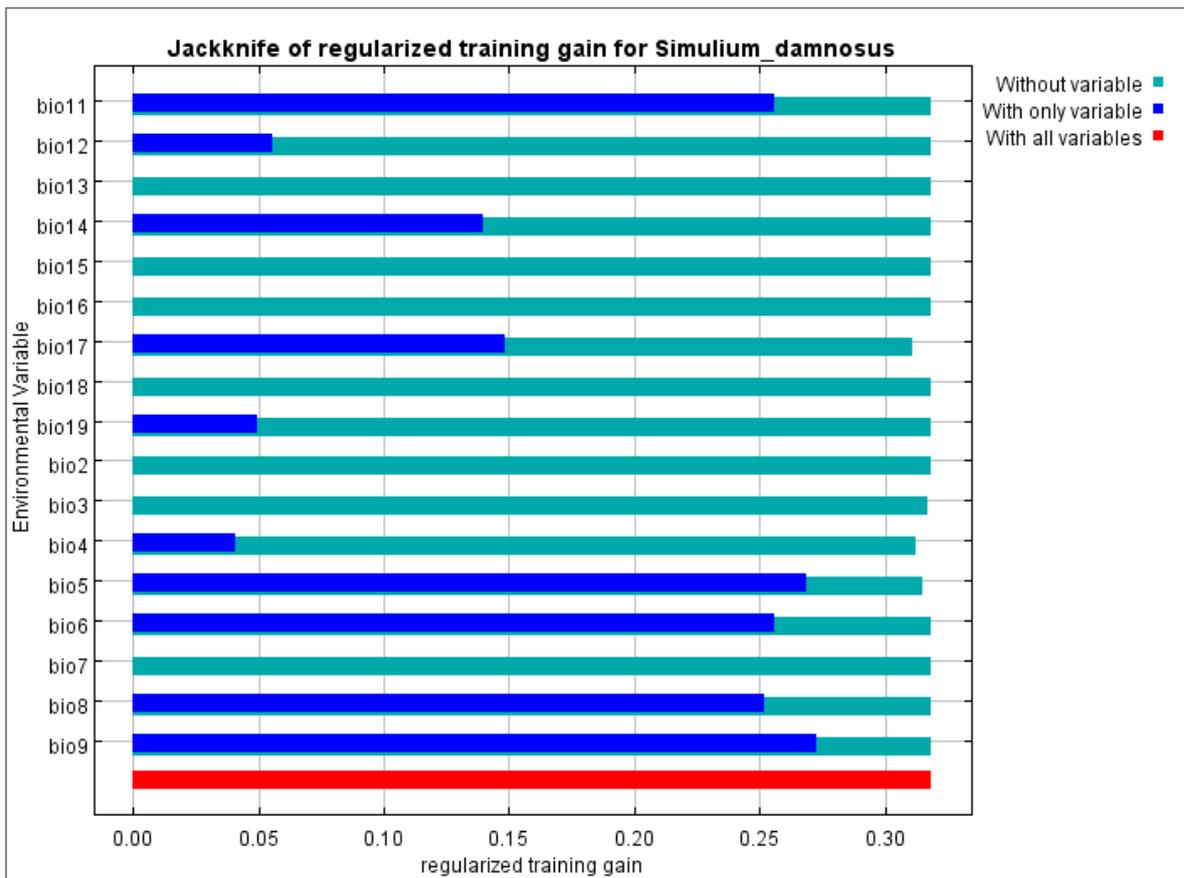


Ilustración 7. Prueba de jackknife para las variables bioclimáticas utilizadas en el modelo actual de distribución geográfica de *Simulium damnosus*.

#### 4.1.1.3 *Tripanosoma cruzi*

El reporte de presencia de la especie *Tripanosoma cruzi* (chinche de triatoma) para el Ecuador continental muestra una distribución geográfica única en la región costa, dentro de los territorios de las provincias de Los Ríos y Guayas, esta última con mayor grado de presencia, sobre todo en la zona costera cercana al Golfo de Guayaquil (Ilustración 8).

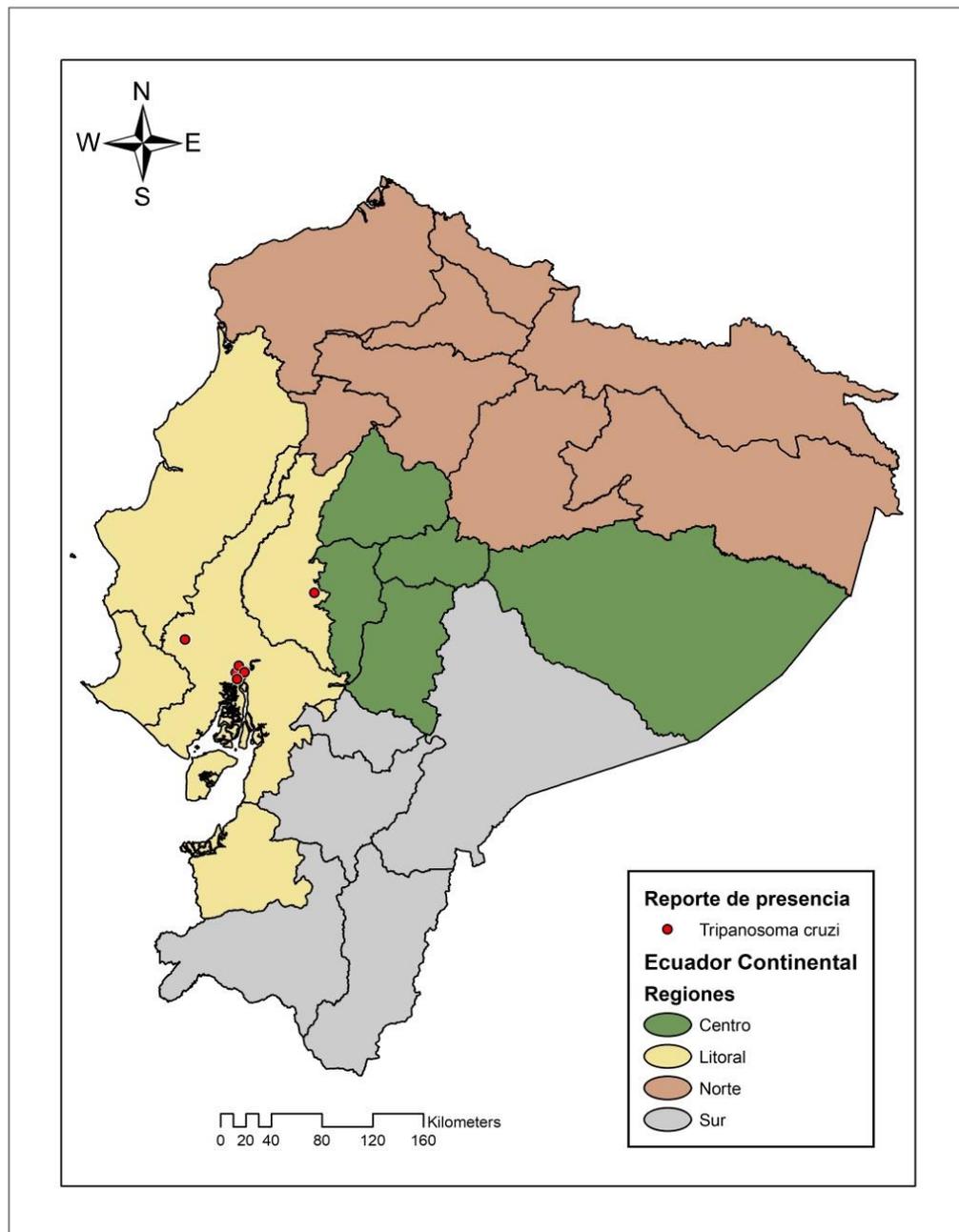


Ilustración 8. Registro de presencia de *Tripanosoma cruzi* en Ecuador continental.

El escenario actual (presente) de distribución geográfica de la especie *Tripanosoma cruzi* muestra la existencia de una zona del Ecuador continental, ubicada en la región litoral (Guayas, Los Ríos y Manabí), que ostenta las condiciones ambientales óptimas para el desarrollo de la especie *T. cruzi*, misma que evidencia los valores de probabilidad más representativos remarcadas de color rojo intenso (43.930 km<sup>2</sup>), seguido de las zonas de mediana probabilidad de color rojo pálido (67.658 km<sup>2</sup>). También se observan áreas con valores de baja y nula probabilidad de presencia de la especie, situadas en el territorio sur, oeste y septentrional del país, remarcadas de color verde (136.882 km<sup>2</sup>) (Ilustración 9).

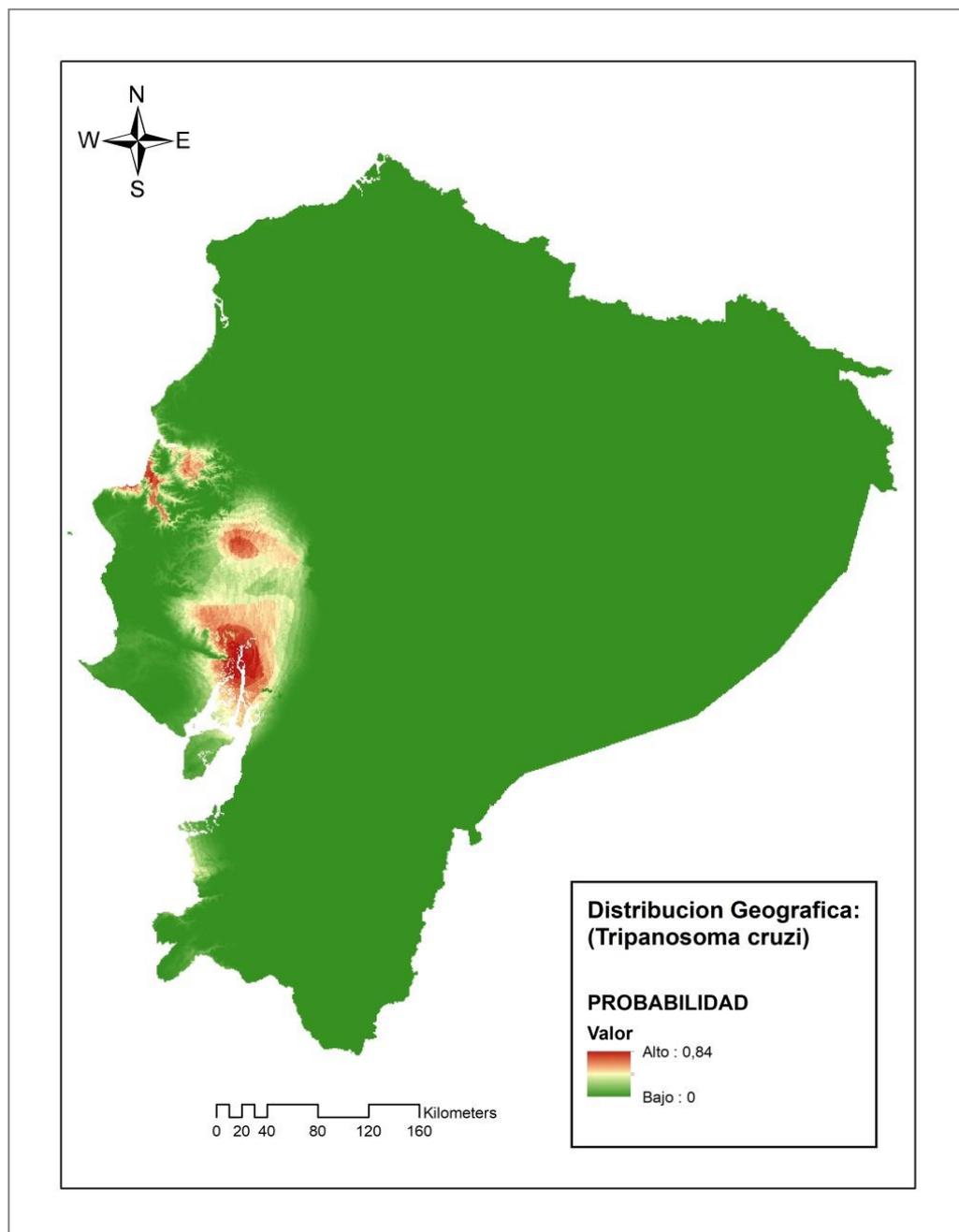


Ilustración 9. Escenario actual de distribución geográfica de *Tripanosoma cruzi*.

Las variables bio14 (precipitación del mes más seco), bio8 (temperatura promedio del trimestre más húmedo) y bio11 (temperatura promedio del trimestre más frío) exhiben una alta correlación, con valores de contribución al modelo de 58,3%, 25,8% y 15,8% respectivamente. Las variables ambientales bio11 y bio14 son igualmente importantes para el modelo de distribución geográfica actual de la especie *Tripanosoma cruzi*, debido a aspectos como: (i) la bio14 posee la mayor ganancia cuando se utiliza aisladamente, lo cual implica que dispone y provee de la información más útil al modelo; (ii) la bio11 disminuye significativamente la ganancia en el momento en que es omitida, lo cual la hace poseedora de la mayor cantidad de información que no está presente en las otras variables intervinientes en el modelo (Ilustración 10).

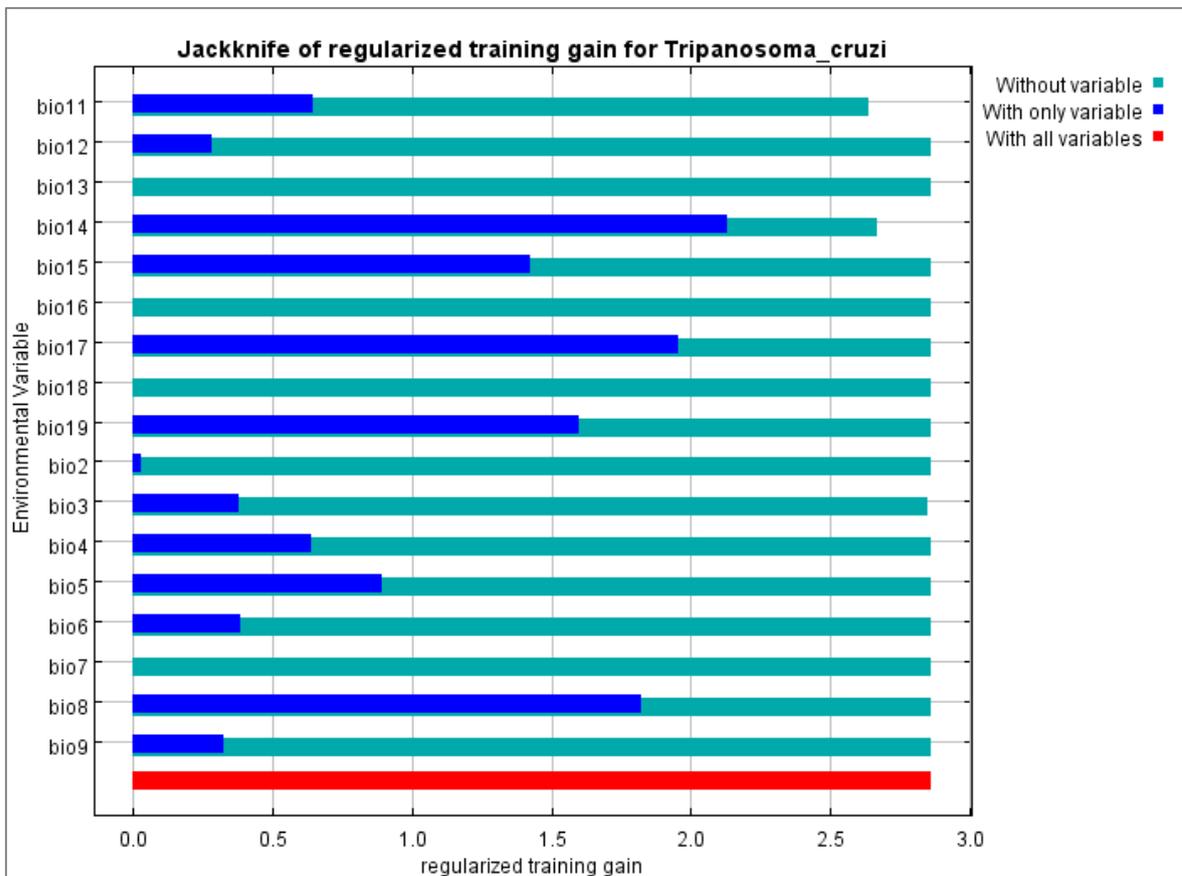


Ilustración 10. Prueba de jackknife para las variables bioclimáticas utilizadas en el modelo actual de distribución geográfica de *Tripanosoma cruzi*.

#### 4.1.2 Área de distribución potencial de invasión de las especies de vectores de enfermedades en escenarios de cambio climático.

##### 4.1.2.1 *Aedes aegypti*

El escenario moderado de cambio climático (RCP45) para los años 2050 y 2070 muestra un incremento de la distribución geográfica de *A. aegypti* en la zona litoral y sur del país; mientras que en el escenario extremo (RCP85) para ambos periodos, la distribución de la especie se proyecta con mayor fuerza hacia las zonas costeras (Ilustración 11).

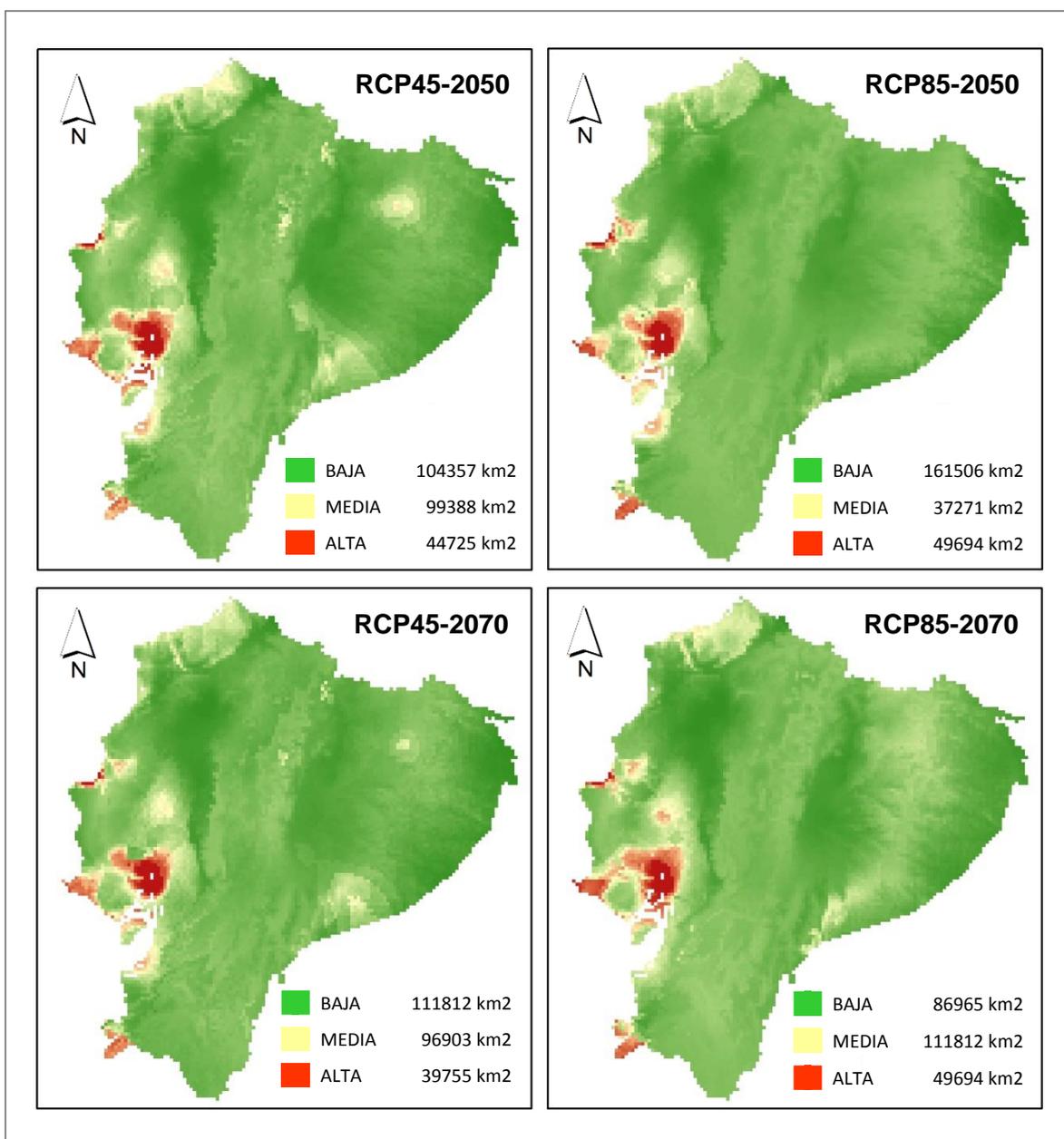


Ilustración 11. Distribución geográfica potencial de *Aedes aegypti* bajo escenarios de cambio climático 2050 (RCP45 y RCP85) y 2070 (RCP45 y RCP85).

#### 4.1.2.2 *Simulium damnosus*

En el escenario moderado de cambio climático (RCP45) para los años 2050 y 2070 se observa que la distribución geográfica de *S. damnosus* se mantiene invariable para todo el territorio continental; algo similar ocurre en el escenario extremo (RCP85) para dichos periodos, en donde la distribución geográfica potencial de la especie se concentra en el callejón interandino, con un mediano incremento hacia la zona litoral (a diferencia del escenario moderado) (Ilustración 12).

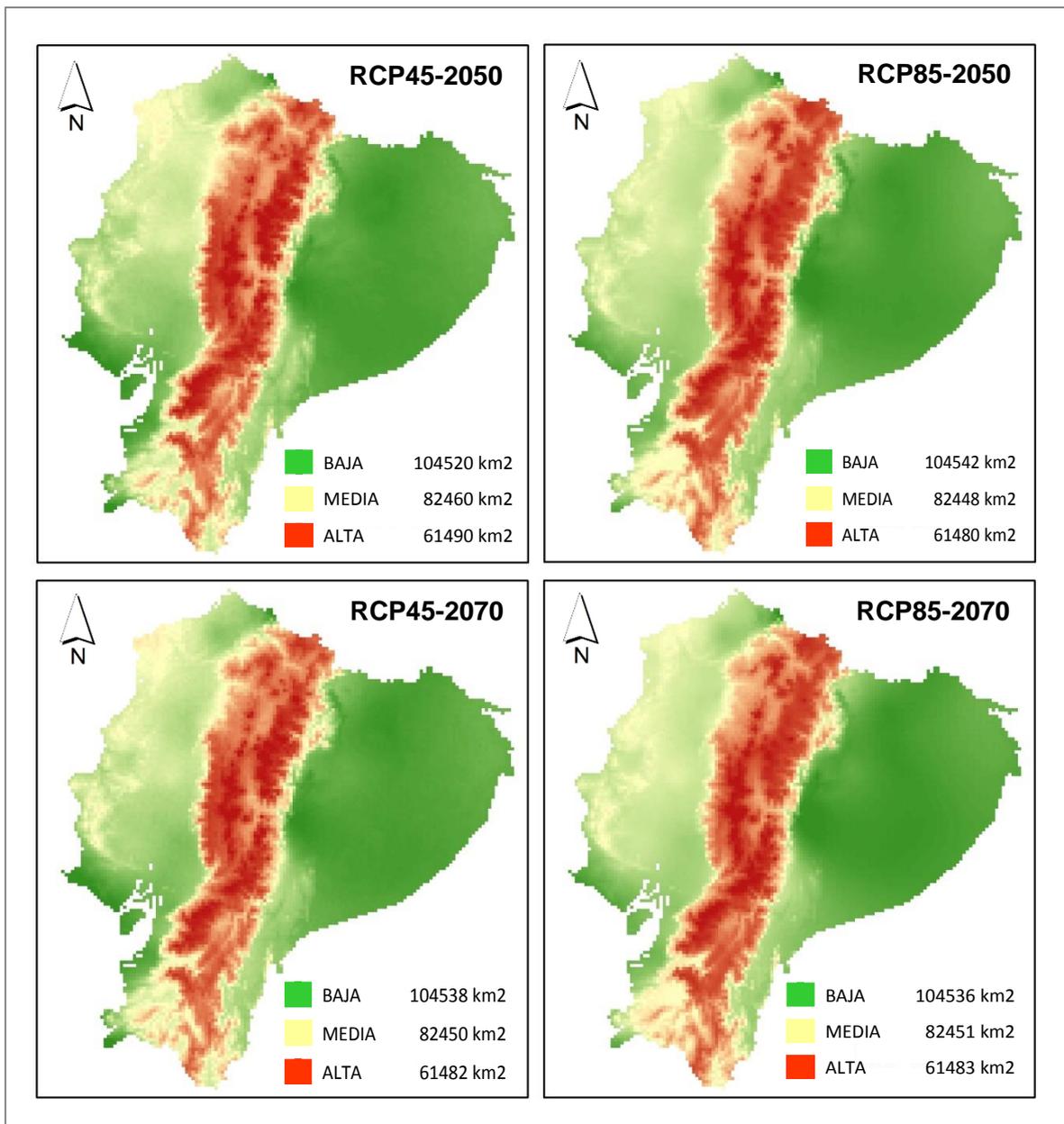


Ilustración 12. Distribución geográfica potencial de *Simulium damnosus* bajo escenarios de cambio climático 2050 (RCP45 y RCP85) y 2070 (RCP45 y RCP85).

#### 4.1.2.3 *Tripanosoma cruzi*

En el escenario moderado de cambio climático (RCP45) para los años 2050 y 2070 se observa que la distribución geográfica de *Tripanosoma cruzi* se proyecta mayoritariamente hacia la zona del Golfo de Guayaquil y la cuenca del río Guayas, y en menor medida hacia el área sur de la provincia de El Oro. Para el escenario extremo RCP85 del año 2070 la proyección geográfica potencial es idéntica; mientras que en el escenario RCP85 del año 2050 se evidencia una zona localizada entre las provincias de Manabí, Guayas y Los Ríos en donde la distribución de la especie se muestra nula (Ilustración 13).

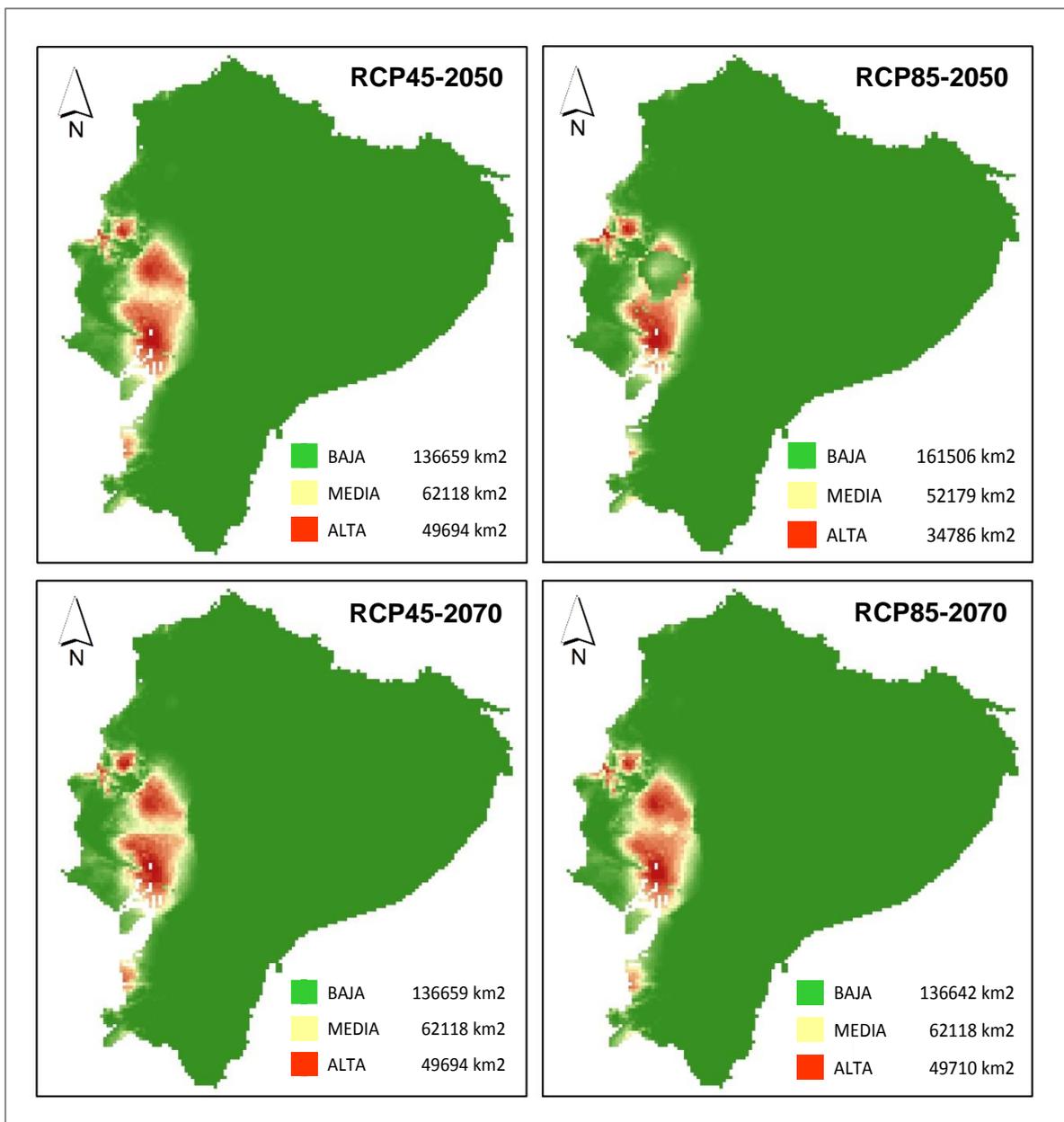


Ilustración 13. Distribución geográfica potencial de *Tripanosoma cruzi* bajo escenarios de cambio climático 2050 (RCP45 y RCP85) y 2070 (RCP45 y RCP85).

## 4.2 Discusión

La especie *Aedes aegypti* (mosquito del dengue) evidencia una distribución geográfica actual muy amplia dentro del territorio del Ecuador continental, con mayor concentración en las provincias de Guayas, Los Ríos y Orellana, y en menor medida para los territorios de Manabí, Esmeraldas, Sto. Domingo, Carchi, Tungurahua, Azuay, Zamora Chinchipe y Loja; asemejándose a lo reportado por Lippi *et al* (2019), quienes expresan que el mosquito *A. aegypti* presenta una distribución geográfica característica para las regiones litoral y amazónica, y con mediana presencia en las provincias de la sierra sur del país (Loja, Azuay y Cañar). Además, se identificó que en las provincias de Guayas, Machala, Esmeraldas, Manabí y Santa Elena coexisten las condiciones ambientales favorables para el desarrollo de la especie, según Stewart *et al* (2013) los entornos idóneos para el progreso del mosquito *A. aegypti* se concentran en zonas muy urbanizadas con presencia de cuerpos de agua y maleza, con topografía heterogénea y mediana elevación (88). Esto a su vez concuerda con la alta incidencia y/o importancia de la variable bioclimática<sup>14</sup> (precipitación del mes más seco), misma que fue la de mayor contribución al modelo de nicho ecológico de la especie.

Los escenarios de cambio climático moderado (RCP45) para los años 2050 y 2070 muestran un incremento de la distribución geográfica potencial de *A. aegypti* en la zona austral y sur del país; mientras que en el escenario extremo (RCP85) para dichos periodos, la distribución de la especie se proyecta con mayor fuerza hacia la región amazónica. Esto concuerda con lo investigado por Lippi *et al* (2019), quienes indican que para dichos escenarios de cambio climático la distribución potencial de la especie *A. aegypti* se proyecta hacia zonas costeras con mediana elevación. En contraste, Alimi *et al* (2015) menciona que la distribución actual de *A. aegypti* está ampliamente definido por las tendencias regionales de temperatura y precipitación, pero el cambio climático global tiene el potencial de alterar significativamente el rango geográfico futuro de los vectores de mosquitos. A medida que las tendencias de temperatura aumentan a nivel mundial, se ha estimado que los patrones observados en la distribución de los vectores de mosquitos cambiarán en consecuencia; estudios previos han proyectado que los mosquitos *Aedes* aumentarán su alcance global a medida que los patrones de temperatura y lluvia se vuelvan más adecuados en varios escenarios de cambio climático.

La distribución geográfica de la especie *Simulium damnosus* (mosca negra) en el Ecuador continental se concentra mayoritariamente en las provincias de Carchi, Cotopaxi y

Chimborazo, en la región sierra, y en los territorios amazónicos de las provincias de Napo y Morona Santiago, siendo Napo la provincia con mayor ocurrencia de la especie. En esta misma línea Post *et al* (2011) identificó un desarrollo potencial para *S. damnosus* en la zona centro sur de la región sierra del país. Es por ello que el escenario de cambio climático extremo modelado para los periodos 2050 y 2070 exhibe una distribución geográfica potencial de la especie en el callejón interandino, zona en la que coexisten las condiciones ambientales adecuadas para el desarrollo de la especie, es por ello que las variables bioclimáticas bio9 (temperatura promedio del trimestre más seco) y bio17 (precipitación en el trimestre más seco) mostraron una importante contribución al modelo realizado. Dentro del escenario actual la zona del callejón interandino muestra una alta idoneidad para el desarrollo de *S. damnosus*, lo cual a su vez guarda relación con las ocurrencias de la especie en dichos territorios. También se reporta condiciones ambientales idóneas para *S. damnosus* en la zona occidental (región costa) y en el oriente del país (Amazonía), esto a la vez concuerda con Espinel (2011) quien informa una alta incidencia de la enfermedad oncocercosis en las poblaciones cercanas a las cuencas del río Mataje (Esmeraldas) y Napo (Sucumbíos, Napo y Orellana), zonas en las que se reportó una alta incidencia de la enfermedad durante la última década.

En contraste con la distribución actual del vector en la zona oriental del Ecuador continental, Noguera (2003) expresa que el ataque de esta especie se concentra en zonas cercanas al lugar de cría, que son arroyos, ríos o torrentes, en general con corriente, en los que el agua es muy oxigenada y con cierta cantidad de materia orgánica en suspensión, pero no contaminadas, condiciones bióticas necesarias para el desarrollo de las larvas; condiciones que son muy idénticas a los sitios de ocurrencia de la especie en Ecuador. Si bien, el país ha sido declarado libre de la “*oncocercosis*” (enfermedad ocasionada por la picadura de la mosca negra); no obstante, aquello no implica la no presencia del vector en el territorio continental.

La distribución geográfica de la especie *Tripanosoma cruzi* (chinche de triatoma) para el Ecuador continental se concentra en las provincias de Los Ríos y Guayas, esta última con mayor grado de presencia, sobre todo en la zona costera cercana al Golfo de Guayaquil, en la que coexisten las condiciones ambientales óptimas para el desarrollo de la especie. En este sentido, Pinto *et al* (2015) expresan que el desarrollo potencial de *T. cruzi* guarda una estrecha relación con entornos adyacentes a cuerpos de agua y niveles de temperatura elevados, lo cual a su vez explica la presencia actual de la especie dentro de la zona de influencia de la cuenca del río Guayas, en donde precisamente se evidencian dichas

condiciones medioambientales. Guevara *et al* (2014) reporta la presencia de *T. cruzi* en zonas con presencia de cultivos de oleaginosas, lo que a su vez contrasta con el tipo de producción agrícola desarrollada en las provincias de Guayas y Los Ríos.

Según Díaz & González (2014) la fuente principal de infección de *Tripanosoma cruzi* en humanos son los triatomíneos no domésticos, infectados de forma natural durante su ciclo de vida enzoótico en vectores selváticos y algunas especies de mamíferos. Estos triatomíneos infectados llegan a las casas atraídos por la luz y las personas. Estas condiciones guardan una estrecha relación con los territorios de las provincias de Guayas y Los Ríos, en donde coexiste una gran producción de mamíferos de granja (cerdos) y corral (ganado), sumado a la alta incidencia de los efectos luminosos procedentes de las conurbaciones. En virtud de ello se explica en cierta forma el alto nivel de ocurrencia de la especie *Tripanosoma cruzi* en la zona medular de la cuenca del río Guayas.

Las variables bio14 (precipitación del mes más seco), bio8 (temperatura promedio del trimestre más húmedo) y bio11 (temperatura promedio del trimestre más frío) exhiben una alta correlación, con valores de contribución al modelo de 58,3%, 25,8% y 15,8% respectivamente. Las variables ambientales bio11 y bio14 son igualmente importantes para el modelo de distribución geográfica actual de la especie *Tripanosoma cruzi*, debido a aspectos como: (i) la bio14 posee la mayor ganancia cuando se utiliza aisladamente, lo cual implica que dispone y provee de la información más útil al modelo; (ii) la bio11 disminuye significativamente la ganancia en el momento en que es omitida, lo cual la hace poseedora de la mayor cantidad de información que no está presente en las otras variables intervinientes en el modelo.

## **CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## 5.1 Conclusiones

- El área de distribución actual de las especies *Aedes aegypti*, *Simulium damnosus* y *Tripanosoma cruzi* para el Ecuador continental obedece a patrones ambientales específicos de temperatura y precipitación, propias de las regiones geográficas del país (costa, sierra y oriente), cuya variabilidad de entornos dan lugar a que dichas especies puedan coexistir en zonas equidistantes.
- Las características ambientales favorables para el desarrollo de las especies *A. aegypti*, *S. damnosus* y *T. cruzi* corresponden a las variables bioclimáticas: bio14 (“precipitación del mes más seco”), bio9 (“temperatura promedio del trimestre más seco”), bio17 (“precipitación en el trimestre más seco”), y bio11 (“temperatura promedio del trimestre más frío”), mismas que contribuyeron mayoritariamente al modelo de distribución geográfica de tales especies, constituyéndose así en las más importantes y/o relevantes.
- La distribución geográfica potencial futura de las especies *A. aegypti*, *S. damnosus* y *T. cruzi* en escenarios de cambio climático moderado (RCP45) y extremo (RCP85) para los años 2050 y 2070 muestra una importante variabilidad en comparación con el escenario actual de distribución, lo cual puede provocar la presencia de dichas especies en zonas en donde antes eran inexistentes, incrementando así los niveles de transmisión de las infecciones portadoras.

## 5.2 Recomendaciones

- Debido a la escasa información de puntos de presencia validados en Ecuador Continental, el Ministerio de Salud Pública del Ecuador debe de emprender campañas de registro de presencias de especies de vectores de interés nacional y validarlas en portales de bases de datos como GBIF para de esta manera facilitar el modelado de especies con registros provenientes de Ecuador.
- Generar y/o actualizar las bases de datos estadísticas y cartográficas existentes a nivel nacional referente a especies de vectores transmisores de enfermedades, a fin de que facilite la identificación de las zonas más propensas al brote de enfermedades infecciosas, y que a la vez permita ejecutar mecanismos de prevención y control.
- Promover la realización de investigaciones a nivel nacional y regional que permitan proyectar la distribución actual y futura de las especies de vectores, mismas que

podrán ser utilizadas como insumo documental para fines de planificación de los organismos competentes de salud pública y medio ambiente.

- Ejecutar medidas de erradicación de vectores transmisores de enfermedades, mediante técnicas no invasivas que permitan inhibir la reproducción y propagación de las especies dentro de sus ambientes de desarrollo (nichos ecológicos).
- Realizar investigaciones relacionadas en la distribución espacial de la morbilidad de enfermedades relacionadas a vectores y la capacidad de respuesta de las autoridades de salud pública Nacional.

## **CAPÍTULO VI. BIBLIOGRAFÍA**

## 6.1 Referencias bibliográficas

1. Uribe E. Estudios del Cambio Climático en América Latina: El cambio climático y sus efectos en la biodiversidad en América Latina. Documento de Proyecto. Santiago de Chile: El cambio climático y sus efectos en la biodiversidad en América Latina (CEPAL); 2015.
2. Useros J. El cambio climático y sus efectos sobre la salud humana. Anales de la Real Academia de Medicina y Cirugía de Valladolid. 2014 noviembre; 51(1): p. 23-54.
3. Sanchez L, Mattar S, Gonzalez M. Cambios climáticos y enfermedades infecciosas: Nuevos retos epidemiológicos. Revista MVZ Córdoba. 2009 septiembre-diciembre; 14(3): p. 1876-1885.
4. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). Calentamiento global de 1,5°C. Paris: OMM/PNUMA; 2018. Report No.: ISBN 978-92-9169-351-1.
5. Andrade S, Chacon K, Rivera B, Sanchez L. Enfermedades transmitidas por vectores y cambio climático. Investigación y Ciencia. 2017 marzo-octubre; 25(72): p. 118-128.
6. Githeko ALS, Confalonieri U, Patz J. El cambio climático y las enfermedades transmitidas por vectores: un análisis regional. Revista Virtual REDESMA. 2009 diciembre; 3(3): p. 22-38.
7. Parham P, Waldock J, Christophides G, Hemming D, Augusto F, Evans K, et al. Climate, environmental and socio-economic change: weighing up the balance in vector-borne disease transmission. Philosophical Transactions Royal Society B. 2015 abril; 370(1665): p. 1-17.
8. Nieves E, Rujano M, Ospino H, Oraa L. Efectos del cambio climático sobre la distribución potencial de los Flebotomíneos Transmisores de Leishmaniasis en Mérida Venezuela. Revista Intropica. 2015 enero-diciembre; 10: p. 60-73.
9. Blanco J. Modelos ecológicos: descripción, explicación y predicción. Revista Científica de Ecología y Medio Ambiente. 2013 septiembre-diciembre; 22(3): p. 1-5.

10. Roberts M, Heesterbeek J. Characterizing the next-generation matrix and basic reproduction number in ecological epidemiology. *Journal of Mathematical Biology*. 2012 octubre; 66(4): p. 1045-1064.
11. Githeko A, Lindsay S, Confalonieri U, Patz J. El cambio climático y las enfermedades transmitidas por vectores: un análisis regional. *Salud y medio ambiente*. 2000; 78(9): p. 1136–1147.
12. Lucas A. Novedades del Sistema de Protección Internacional de Cambio Climático: el Acuerdo de París. *Estudios internacionales (Santiago)*. 2017; 49(186): p. 137-167.
13. Mateo R, Felicísimo A, Muñoz J. Modelos de distribución de especies y su potencialidad como recurso educativo interdisciplinar. *Reduca (Biología)*. 2012 enero; 5(1): p. 137-153.
14. Navarro J, Enriquez S, Arrivillaga J, Benitez W. Un nuevo *Aedes* para la Amazonía de Ecuador y actualización taxonómica del género para el país. *Boletín de Malariología y Salud Ambiental*. 2016 diciembre; 56(2): p. 113-121.
15. Servicio Nacional de Control de Enfermedades Transmitidas por Vectores Artrópodos (SNEM). Proyecto de vigilancia y control de vectores para la prevención de la transmisión de enfermedades metaxenicas en el Ecuador. Guayaquil; 2013.
16. Heydari N, Larsen D, Neira M, Beltrán E, Fernández P, Adrián J, et al. Proyecto de vigilancia y control de vectores para la prevención de la transmisión de enfermedades metaxenicas en el Ecuador. *Revista Internacional de Investigación Ambiental y Salud Pública*. 2017 febrero; 14(2).
17. Lizarazo C, Rodríguez G. Revisión epidemiológica de la Oncocercosis en América Latina. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*. 2010 enero-abril; 28(1): p. 73-80.
18. Espinel M. Eliminación de la oncocercosis en Ecuador: un sueño hecho realidad. In XX Congreso Latinoamericano de Parasitología. In Simposio sobre Enfermedades Parasitarias de la Cuenca Amazónica; 2011; Quito. p. 3-315.
19. Chiluisa V. Determinación por PCR-ELISA de la reducción de la tasa de infección natural de las principales especies vectoras de *Onchocerca volvulus*, luego de la

distribución masiva de Ivermectina (Mectizan®). Sangolqui: Escuela Politécnica del Ejército (ESPE); 2006.

20. Guevara A, Moreira J, Criollo H, Vivero S, Racines M, Cevallos V, et al. Primera descripción de la infección humana por *Trypanosoma cruzi* en la provincia de Esmeraldas, Ecuador. *Parásitos & Vectores*. 2014; 7(358).
21. Ocaña S, Llewellyn M, Costales J, Miles M, Grijalva M. Sexo, subdivisión y dispersión doméstica del linaje I de *Trypanosoma cruzi* en el sur de Ecuador. *PLoS Negl Trop Dis*. 2010 diciembre; 4(12): p. 1-8.
22. Rueda K, Trujillo J, Carranza J, Vallejo G. Transmisión oral de *Trypanosoma cruzi*: una nueva situación epidemiológica de la enfermedad de Chagas en Colombia y otros países suramericanos. *Revista Biomédica*. 2014 noviembre-junio; 34(4): p. 631-641.
23. Dumonteil E, Herrera C, Martini L, Grijalva M, Guevara A, Costales J, et al. La enfermedad de Chagas no se ha controlado en Ecuador. *PLoS ONE*. 2016 marzo-junio; 11(6): p. 1-4.
24. Diaz G. El Cambio Climatico. *Ciencia y Sociedad*. 2012 abril-junio; 37(2): p. 227-240.
25. Cuelga O RAKMZGSAJDea. ¿Centinelas del ecosistema para el cambio climático? Evidencia de cambios en la cobertura de humedales en los últimos 30 años en los Andes tropicales. *Plos ONE*. 2017 mayo; 12(5).
26. van den Hurk B TALGUAOGKCEa. Nuevos escenarios de cambio climático para los Países Bajos. *Water Sci Technol*. 2007; 56(4): p. 27-33.
27. Huang C GAWXVPFGTS. Proyección de la mortalidad futura relacionada con el calor en escenarios de cambio climático: una revisión sistemática. *Perspectiva de salud ambiental*. 2011 diciembre; 119(12): p. 1681-1690.
28. Lief C. Las variables climaticas esenciales. In Conferencia internacional del 50 aniversario del IODE; 2011; Lieja. p. 1-18.

29. Bojinski S. The Concept of Essential Climate Variables in Support of Climate Research, Applications, and Policy. World Meteorological Organization. 2014 october;; p. 1431-1443.
30. Braks M GGTLSHLT. Hacer que funcione la vigilancia de enfermedades transmitidas por vectores: nuevas oportunidades desde las perspectivas de los ODS. Frente Veterinario Sci. 2019 julio; 6: p. 1-9.
31. USGCRP. Los impactos del cambio climático en la salud humana en los Estados Unidos: una evaluación científic. Washington, DC: Programa de Investigación de Cambio Global de Estados Unidos; 2016.
32. Gonzalez A. Predadores y parásitos nativos de San Pedro de las Colonias, Coahuila. Otoño-Invierno 2016-2017. Torreon: Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro"; 2017.
33. Kamiya T OKNSPR. Lo que determina la riqueza de especies de parásitos organismos? Un metaanálisis a través de animales, huéspedes de plantas y hongos. Revista de Biología. 2014; 89: p. 123-134.
34. OPS (Organización Panamericana de la Salud). Abordaje de los determinantes ambientales de la salud en las estrategias de vigilancia y control de vectores: orientaciones para promover intervenciones clave. Washington, DC.; 2019. Report No.: ISBN: 978-92-75-32130-0..
35. López M NM. Influencia del cambio climático en la biología de *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae) mosquito transmisor de arbovirosis humanas. Revista Ecuatoriana de Medicina y Ciencias Biologicas. 2016 noviembre; 37(2): p. 11-21.
36. Post R OESSMHCJUP. Una guía para el complejo *Simulium damnosum* (Diptera: Simuliidae) en Nigeria, con una clave citotaxonómica para la identificación de las especies hermanas. Ann Trop Med Parasitol. 2011 junio; 105(4): p. 277-297.
37. Pinto M OSTELSZAAFea. Murciélagos, tripanosomas y triatominos en Ecuador: nuevas ideas sobre la diversidad, la transmisión y los orígenes del tripanosoma cruzi y la enfermedad de Chagas. PLoS ONE. 2015 octubre; 10(10): p. 1-13.

38. Garcia A, Denis D. Un ejemplo teorico de modelacion del habitat y la distribucion potencial por analisis factorial del nicho ecologico. *Mesoamericana*. 2012 julio; 16(3): p. 12-21.
39. Wang Y, Stone L. Comprender las conexiones entre los modelos de distribución de especies para los datos de presencia y antecedentes. *Ecologia Teorica*. 2019 septiembre; 12(1): p. 73-88.
40. Parra G. Sistemas de información geográfica y sensores remotos. Aplicaciones en enfermedades transmitidas por vectores. *Revista CES Medicina*. 2010 julio-diciembre; 24(2): p. 75-89.
41. Gaston A. Aplicacion de los Sistemas de Informacion Geografica a estudios floristicos y corologicos: Algunos ejemplos. *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.* 2008; 28: p. 9-13.
42. March I. El uso de los SIG y otras tecnologías en la prevención, control y erradicación de especies invasoras. Monterrey: The Nature Conservancy; 2008.
43. Diaz C, Pereyra N, Coccola M. Sistema de Información Geográfico para el Monitoreo Poblacional de Aves en Agroecosistemas. In *Primeras Jornadas de Latinoamerica y Caribe: Usuarios de gvSIG*; 2009; Santa Fe. p. 1-22.
44. Silva KGP, Gomes G, Da Silva W. Efecto del cambio climatico en la distribucion de especies de ranas cornudas comunes en America del Sur. *PlosOne*. 2018 septiembre; 13(9): p. 1-17.
45. Pocheville A. *The Ecological Niche: History and Recent Controversies*. Sydney: University of Sydney, Department of Philosophy ; 2015.
46. Gutierrez O, Camara R, Senciales J, Garcia L. Modelos predictivos en Biogeografía: aplicación para la modelización de nichos ecológicos en Geografía Física. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*. Madrid.; 2018. Report No.: ISSN: 0212-9426.
47. Illoldi P, Escalante T. De los modelos de nicho ecológico a las áreas de distribución geográfica. *Biogeografia*. 2008 Enero;; p. 7-12.

48. Plasencia A, Escalona G, Esparza L. Modelacion de la distribucion geografica potencial de dos especies de psitacidos neotropicales utilizando variables climaticas y topograficas. *Acta Zoológica Mexicana (nueva serie)*. 2014 diciembre-enero; 30(3): p. 471-490.
49. Cuervo A, Escobar L, Osorio L, Nori J, Varela S, Martinez E, et al. Introduccion a los analisis espaciales con enfasis en modelos de nicho ecologico. *Biodiversity Informatics*. 2017 junio; 12: p. 45-57.
50. Gonzalez A, Manjarrez J, Garcia U, D'Addario M, Sunny A. Modelo de nicho ecológico presente y futuro de especies de serpientes de liga del cinturón volcánico transmexicano. *PeerJ*. 2018 abril; 6(e4618): p. 1-20.
51. Garcia E, Guisande C, Manjarres A, Gonzalez J, Heine J, Pelayo P, et al. ¿Podemos obtener patrones macroecológicos a partir de los datos primarios del Fondo Mundial de Información sobre la Biodiversidad? *Revista de Macroecología*. 2014 diciembre; 24(3): p. 335-347.
52. Otegui J, Ariño A, Encinas M, Pando F. Evaluación de los datos primarios alojados por el Nodo Español del Fondo Mundial de Información sobre la Biodiversidad (GBIF). *PlosOne*. 2013 enero; 8(1): p. 1-15.
53. Amano T, Lamming J, Sutherland W. Lagunas espaciales en la información sobre la biodiversidad mundial y el papel de la ciencia ciudadana. *BioScience*. 2016 mayo; 66(5): p. 393-400.
54. Yesson C, Brewer P, Sutton T, Caithness N, Pahwa J, Burgerss M, et al. ¿Cuán global es la instalación de información mundial sobre biodiversidad? *PlosOne*. 2007 noviembre; 2(11): p. 1-10.
55. Varela S, Terrible L, De Oliveira G, Diniz J, Gonzalez J. *ecoClimate vs. Worldclim: variables climáticas SIG para trabajar en biogeografía*. *Ecosistemas*. 2015 diciembre; 24(3): p. 88-92.

56. Poggio L, Simonetti E, Gimona A. Enhancing the WorldClim data set for national and regional applications. *Science of The Total Environment*. 2018 june; 625(1): p. 1628-1643.
57. Marchi M, Sinjur I, Bozzano M, Westergren M. Evaluating WorldClim Version 1 (1961–1990) as the Baseline for Sustainable Use of Forest and Environmental Resources in a Changing Climate. *Sustainability*. 2019 mayo; 11(3043): p. 3-14.
58. Samimi M, Samimi A. Non-Climatically Factors Causing Weather Changes. *International Journal of Science and Engineering Investigations*. 2012 octubre; 1(9): p. 35-41.
59. Viguera B, Martinez R, Donatti C, Harvey C, Alpizar F. El clima, el cambio climático, la vulnerabilidad y acciones contra el cambio climático: Conceptos básicos. Turrialba: Centro Agronómico Tropical de Investigación y enseñanza (CATIE); 2017.
60. Díaz G. El Cambio Climático. *Ciencia y Sociedad*. 2012 abril-junio; XXXVII(2): p. 227-240.
61. Rodriguez E, Suazo L. Introducción al cambio climático. Tegucigalpa: Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Departamento de Ambiente y Desarrollo; 2017.
62. Rodriguez M, Mance H. Cambio climático: lo que está en juego Bogotá: Foro Nacional Ambiental; 2009.
63. Lorente I, Gamo D, Gomez J, Santos R, Flores L, Camacho A, et al. Los efectos biológicos del cambio climático. *Ecosistemas*. 2004 enero; 13(1): p. 103-110.
64. Gitay H, Saurez A, Watson R, Dokken D. Cambio climático y biodiversidad. Sidney: IPCC/PNUMA/OMM/WHO/UNEP; 2002. Report No.: ISBN: 92–9169–104–7.
65. Conde A, Lopez J. Variabilidad y cambio climático. Impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en América Latina y el Caribe: Propuestas para Métodos de Evaluación. Ciudad de México: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático; 2016.

66. CEPAL. El cambio climático y sus efectos en la biodiversidad de America Latina. Santiago de Chile: Naciones Unidas; 2017.
67. Githeko A LSCUPJ. El cambio climatico y las enfermedades transmitidas por vectores: un analisis regional. Salud y Medio Ambiente. 2000; 78(9): p. 1136-1147.
68. Campos M GA. El Fenómeno del niño y la seroprevalencia de enfermedad de Chagas. Bogota, DC: Universidad Sergio Argoleda; 2015.
69. Malagon J, Garrote C, Castilla P. Cambio climático y salud humana: una revisión desde la perspectiva colombiana. Salud Uninorte. 2017; 33(2): p. 224-241.
70. OMS (Organización Mundial de la Salud). Cambio climático y salud humana - Riesgos y respuestas. Ginebra;; 2003.
71. Roque L, Alfonso Y, Gonzalez M, Perez N. Influencia del cambio climático en la emergencia del Zika. Revista 16 de Abril. 2018 abril; 57(270): p. 284-288.
72. INECC. Influencia del cambio climático en el movimiento de vectores y su posible efecto en las comunidades de la region fronteriza. In Binational Symposium: Exploring Environmental and Health Aspects of Zika, Dengue, Chikungunya, and Rocky Mountain Spotted Fever; 2016; Nogales. p. 34.
73. Warren D, Seifert S. Ecological niche modeling in Maxent: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria. Ecological Applications. 2011 marzo; 21(2): p. 335-342.
74. Cruz G, Villaseñor J, Lopez L, Martinez E, Ortiz E. Selección de predictores ambientales para el modelado de la distribución de especies en Maxent. RCHSCFA. 2014 mayo; 20(5): p. 187-201.
75. Samaniego J. Cambio climático y desarrollo en América Latina y el Caribe: una reseña. Santiago de Chile: CEPAL; 2009.
76. Andrade S, Chacon K, Rivera B, Sanchez L. Enfermedades transmitidas por vectores y cambio climático. Investigación y Ciencia. 2017 marzo; 25(72).

77. Carbajo A. Evaluación de los impactos del cambio climático sobre la salud: Economía del cambio climático en la Argentina. Santiago de Chile: Naciones Unidas; 2015. Report No.: ISSN 1564-4189.
78. Quesada M, Acosta L, Arias D, Rodriguez A. Modelación de nichos ecológicos basado en tres escenarios de cambio climático para cinco especies de plantas en zonas altas de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kuru*. 2016 septiembre; 14(34): p. 1-13.
79. Macias J. Distribucion actual y potencial de especies leñosas alimenticias en Africa para la formulacion de estrategias de conservacion. Trabajo Fin de Master. Madrid: Universidad Complutense de Madrid; 2016.
80. Phillips S, Dudik M. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*. 2008; 31: p. 161-175.
81. Alimi T FDQWHSAMQMea. Predicción de posibles rangos de vectores primarios de malaria y malaria en el norte de América del Sur en función de los cambios proyectados en el clima, la cobertura del suelo y la población humana. *Parásitos y vectores*. 2015 agosto; 8(431): p. 83-90.
82. Lippi C SABFDJEN. Cambios geográficos en la idoneidad del hábitat de *Aedes aegypti* en Ecuador utilizando datos de vigilancia de larvas y modelos de nicho ecológico: implicaciones del cambio climático para el control de vectores de salud pública. *PLoS Negl Trop Dis*. 2019 abril; 13(4): p. 1-19.
83. Escobar L RDLRLMCMBMea. Disminución de la prevalencia de vectores de enfermedades bajo el cambio climático. *Informes científicos*. 2016 diciembre; 6(39150): p. 1-8.
84. Ren Z WDMAHJBASHea. Predicción de la distribución del vector de la malaria en escenarios de cambio climático en China: Desafíos para la eliminación del paludismo. *Artículos Científicos*. 2016 febrero; 6(20604): p. 1-13.
85. Ryan S, Carlson C, Mordecai E, Johnson L. Expansión global y redistribución del riesgo de transmisión del virus transmitido por *Aedes* con el cambio climático. *PLOS Neglected Tropical Diseases*. 2019 marzo; 13(3): p. 1-20.

86. Garrido R, Bacigalupo A, Peña F, Bustamante R, Cattán P, Gorla D, et al. Impacto potencial del cambio climático en la distribución geográfica de dos vectores silvestres de la enfermedad de Chagas en Chile: *Mepraia spinolai* y *Mepraia gajardoi*. *Parasitos y Vectores*. 2019; 12(478).
87. Ceccarelli S, Rabinovich J. Los efectos del cambio climático mundial en la vulnerabilidad de Venezuela a la enfermedad de Chagas están relacionados con la distribución geográfica de cinco especies de triatominos. *Revista de Entomología Médica*. 2015 noviembre; 52(6): p. 1333-1343.
88. Moo D. Nicho ecológico actual y futuro de la Leishmaniasis (Kinetoplastida: Trypanosomatidae) en la región Neotropical. *Revista de Biología Tropical*. 2016 septiembre; 64(3): p. 1237-1245.
89. Gartneer C. SCIENCING: How to Calculate the Mean Annual Temperature. [Online].; 2018 [cited 2019 diciembre 17. Available from: <https://sciencing.com/calculate-mean-annual-temperature-7236109.html>.
90. O'Donnell MS, aIDA. Bioclimatic Predictors for Supporting Ecological Applications in the Conterminous United States Virginia: U.S. Geological Survey; 2012.
91. Hijmans R, Cameron S, Parra J, Jone P, Jarvis A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*. 2005 september; 25: p. 1965-1978.
92. Natural Resources Canada. Regional, national and international climate modeling. [Online].; 2018 [cited 2019 diciembre 17. Available from: <https://cfs.nrcan.gc.ca/projects/3/1>.
93. Stewart A, Ryan S, Beltran E, Mejia R, Silva M, Muñoz A. Dengue Vector Dynamics (*Aedes aegypti*) Influenced by Climate and Social Factors in Ecuador: Implications for Targeted Control. *Plos One*. 2013 noviembre; 8(11).
94. Noguera P. Oncocercosis. *Archivos de la Sociedad Española de Oftalmología*. 2003; 78(4).

95. Diaz M, Gonzalez C. Enfermedad de Chagas agudo: transmisión oral de Trypanosoma cruzi como una vía de transmisión re-emergente. Revista de la Universidad Industrial de Santander. Salud. 2014 mayo-agosto; 46(2).

## **CAPÍTULO VII. ANEXOS**

## 7.1 Anexos de la investigación

### Anexo 1. Puntos de presencia de *Aedes aegypti*

| Especie              | Coordenadas UTM |          |
|----------------------|-----------------|----------|
|                      | X (Norte)       | Y (Este) |
| <i>Aedes aegypti</i> | 644225          | 1010728  |
| <i>Aedes aegypti</i> | 867755          | 1008255  |
| <i>Aedes aegypti</i> | 531175          | 9894908  |
| <i>Aedes aegypti</i> | 631071          | 9870849  |
| <i>Aedes aegypti</i> | 735052          | 9974037  |
| <i>Aedes aegypti</i> | 952540          | 9942287  |
| <i>Aedes aegypti</i> | 997784          | 9938318  |
| <i>Aedes aegypti</i> | 100360          | 9932233  |
| <i>Aedes aegypti</i> | 104620          | 9912918  |
| <i>Aedes aegypti</i> | 104620          | 9912918  |
| <i>Aedes aegypti</i> | 954921          | 9885137  |
| <i>Aedes aegypti</i> | 105480          | 9910934  |
| <i>Aedes aegypti</i> | 770771          | 9848327  |
| <i>Aedes aegypti</i> | 789027          | 9844358  |
| <i>Aedes aegypti</i> | 633452          | 9792764  |
| <i>Aedes aegypti</i> | 691726          | 9773913  |
| <i>Aedes aegypti</i> | 618701          | 9776558  |
| <i>Aedes aegypti</i> | 713290          | 9664970  |
| <i>Aedes aegypti</i> | 732472          | 9554506  |
| <i>Aedes aegypti</i> | 685509          | 9520111  |
| <i>Aedes aegypti</i> | 572179          | 9707745  |
| <i>Aedes aegypti</i> | 576103          | 9700170  |
| <i>Aedes aegypti</i> | 612660          | 9762778  |
| <i>Aedes aegypti</i> | 614378          | 9757145  |
| <i>Aedes aegypti</i> | 618696          | 9757750  |
| <i>Aedes aegypti</i> | 616491          | 9752769  |
| <i>Aedes aegypti</i> | 613225          | 9753312  |
| <i>Aedes aegypti</i> | 607897          | 9752724  |
| <i>Aedes aegypti</i> | 605252          | 9747961  |
| <i>Aedes aegypti</i> | 614332          | 9748654  |
| <i>Aedes aegypti</i> | 618286          | 9746543  |
| <i>Aedes aegypti</i> | 620411          | 9741047  |
| <i>Aedes aegypti</i> | 618641          | 9749942  |

**Anexo 2. Puntos de presencia de *Simulium damnosus***

| Especie                  | Coordenadas UTM |          |
|--------------------------|-----------------|----------|
|                          | X (Norte)       | Y (Este) |
| <i>Simulium damnosus</i> | 780507          | 1001370  |
| <i>Simulium damnosus</i> | 753387          | 9952213  |
| <i>Simulium damnosus</i> | 696237          | 9878394  |
| <i>Simulium damnosus</i> | 738504          | 9877283  |
| <i>Simulium damnosus</i> | 857699          | 9936418  |
| <i>Simulium damnosus</i> | 857699          | 9950176  |
| <i>Simulium damnosus</i> | 855265          | 9942556  |
| <i>Simulium damnosus</i> | 843094          | 9875881  |
| <i>Simulium damnosus</i> | 725619          | 9745705  |
| <i>Simulium damnosus</i> | 731175          | 9752055  |
| <i>Simulium damnosus</i> | 801819          | 9633786  |

**Anexo 3. Puntos de presencia de *Tripanosoma cruzi***

| Especie                  | Coordenadas UTM |          |
|--------------------------|-----------------|----------|
|                          | X (Norte)       | Y (Este) |
| <i>Tripanosoma cruzi</i> | 620984          | 9765756  |
| <i>Tripanosoma cruzi</i> | 623418          | 9771265  |
| <i>Tripanosoma cruzi</i> | 628026          | 9766203  |
| <i>Tripanosoma cruzi</i> | 683161          | 9829256  |
| <i>Tripanosoma cruzi</i> | 580965          | 9792214  |
| <i>Tripanosoma cruzi</i> | 622277          | 9760602  |

**Anexo 4. Valores de AUC y Roc Parcial para *Aedes aegypti***

| Especie              | Escenario           | AUC   | Roc Parcial |
|----------------------|---------------------|-------|-------------|
| <i>Aedes aegypti</i> | Presente            | 0.877 | 1.795       |
|                      | Futuro 2050 (RCP45) | 0.867 | 1.451       |
|                      | Futuro 2050 (RCP85) | 0.848 | 1.345       |
|                      | Futuro 2070 (RCP45) | 0.855 | 1.437       |
|                      | Futuro 2070 (RCP85) | 0.843 | 1.344       |

**Anexo 5. Valores de AUC y Roc Parcial para *Simulium damnosus***

| Especie           | Escenario           | AUC   | Roc Parcial |
|-------------------|---------------------|-------|-------------|
| Simulium damnosus | Presente            | 0.803 | 0.540       |
|                   | Futuro 2050 (RCP45) | 0.820 | 0.626       |
|                   | Futuro 2050 (RCP85) | 0.804 | 0.548       |
|                   | Futuro 2070 (RCP45) | 0.812 | 0.599       |
|                   | Futuro 2070 (RCP85) | 0.802 | 0.546       |

**Anexo 6. Valores de AUC y Roc Parcial para *Tripanosoma cruzi***

| Especie           | Escenario           | AUC   | Roc Parcial |
|-------------------|---------------------|-------|-------------|
| Tripanosoma cruzi | Presente            | 0.985 | 3.463       |
|                   | Futuro 2050 (RCP45) | 0.978 | 2.862       |
|                   | Futuro 2050 (RCP85) | 0.985 | 3.124       |
|                   | Futuro 2070 (RCP45) | 0.979 | 2.922       |
|                   | Futuro 2070 (RCP85) | 0.978 | 2.851       |