



UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
CARRERA LICENCIATURA EN GESTIÓN AMBIENTAL

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

Título del Proyecto de Investigación:

**ANÁLISIS DE RIESGO DE EXPANSIÓN DE *Fusarium oxysporum* F.sp. *cubense*
ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO EN ECUADOR CONTINENTAL**

Autora:

Barahona Manzaba Domenica Gabriela

Director de Proyecto de Investigación:

Dra. Yarelys Ferrer Sánchez

Quevedo – Los Ríos - Ecuador

2021

DECLARACIÓN DE AUTORIA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, **Domenica Gabriela Barahona Manzaba**, declaro que la investigación aquí descrita 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 documento, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Domenica Gabriela Barahona Manzaba
C.C. # 1726435041

CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

El suscrito, **Dra. Yarelys Ferrer Sánchez**, Docente de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, certifica que el estudiante **Domenica Gabriela Barahona Manzaba**, realizó el Proyecto de Investigación de grado titulado **ANÁLISIS DE RIESGO DE EXPANSIÓN DE *Fusarium oxysporum* F.sp. *cubense* ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO EN ECUADOR CONTINENTAL**, previo a la obtención del título de Licenciatura en Gestión Ambiental, bajo mi dirección, habiendo cumplido con las disposiciones reglamentarias establecidas para el efecto.

Dra. Yarelys Ferrer Sánchez

DIRECTORA DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

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



Urkund Analysis Result

Analysed Document: TESIS-FUSARIUM OXYSPORUM.docx (D98327756)
Submitted: 3/14/2021 11:59:00 PM
Submitted By: yferrer@uteq.edu.ec
Significance: 7 %

Sources included in the report:

TESIS_CARRERA.pdf (D56830276)
Tesis Carlos Carrera 31-12-2018+AE+CC+AE+CC+AE+CC 8-3-2019_v2_LC- CC 2-09-2019 SIN
COMENTARIOS.pdf (D56331272)
alex_coveña_urkund_tesis.docx (D43249664)
2019_01_03 Tesis version para urkund.docx (D46361984)

Dra. Yarelys Ferrer Sánchez

DIRECTORA DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

CERTIFICADO DE APROVACIÓN POR TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



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

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Título

**ANÁLISIS DE RIESGO DE EXPANSIÓN DE *Fusarium oxysporum* F.sp. *cubense*
ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO EN ECUADOR CONTINENTAL**

Presentado a la comisión Académica como requisito previo a la obtención del título de
Licenciatura en Gestión Ambiental.

Aprobado por:

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Dr. Carlos Belezaca Pinargote

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Dra. Lidia Vlassova

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Dr. Oscar Prieto Benavides



AGRADECIMIENTO

Para ti, Dios, me has llevado de la mano siempre, para cumplir con mis responsabilidades académicas, como de la vida cotidiana, eternamente agradecida por darme sabiduría, perseverancia porque hubo muchos obstáculos, pero tu amor me habló y me hablará cada mañana para decirme que los esfuerzos tienen su recompensa.

Por consiguiente, a quien me guio en este lapso de tiempo, mi tutora, Dra. Yarelys Ferrer, por ser una excelente profesional que cumplió desde un principio con su rol, importándome sus conocimientos y poderlos llevar a cabo en este proyecto de investigación, con toda su predisposición e inteligencia que la caracteriza.

A mi mamá, quien fue el amuleto espiritual en toda esta trayectoria, con sus sabios consejos que me impartió desde la infancia, puedo decir que logré uno de nuestros objetivos, mencionando que desde tu partida, me enseñaste a valorar más la vida, hacerme responsable de cada paso que dé durante las adversidades cotidianas.

Y como no, a mi compañero de vida por ser un pilar fundamental en esta etapa, quien escucha mis angustias, mantiene su paciencia, me da ánimos en esos días grises con nuestro adorado hijo, Diego Alejandro, que llegó a iluminar nuestras vidas hace meses, siendo mi motivación diaria para poder llegar a cumplir mis metas.

Para finalizar, a mi familia, por darme su apoyo siempre, tía Daisi, quien me brindó hospedaje y muchas cosas más en estos años de estudio y a mis amigos, mi grupito de la U, que sin ustedes no hubiera sido lo mismo toda esta trayectoria.

D. Gabriela Barahona Manzaba.

RESUMEN

El patógeno *Fusarium oxysporum* F.sp. *cubense*, es causante de la enfermedad mal de Panamá transmitida desde el suelo hacia el cultivo. Junto con el cambio climático es una de las principales influencias no negociables en la biodiversidad, que provoca desequilibrio en el bienestar de la producción bananera. Este proyecto de investigación tiene como objetivo evaluar los cambios en la distribución geográfica potencial de *Fusarium oxysporum* F.sp. *cubense* en Ecuador continental ante escenarios de cambio climático. En este sentido, se investigó y analizó información mediante la plataforma NicheToolBox sobre la expansión del hongo en diferentes regiones del Ecuador, teniendo en cuenta variables climáticas y escenarios de trayectorias de concentración representativas (RCP). Para la modelación del nicho climático de la especie se usó el algoritmo de máxima entropía Maxent. Según la distribución geográfica potencial presente y futura, la especie se distribuye hacia zonas de la región Sierra con mayor índice de adecuación, seguido de la Costa. La mayor influencia en la distribución potencial presente y futura del patógeno corresponde a las variables temperatura mensual en un rango de 2.5°C hasta los 24°C. Por otro lado, se determinó que ante los escenarios de cambio climático, la mayor expansión se encuentra en el escenario extremo (RCP 8.5) con 33997.46 km² para el 2070, existiría una mayor expansión en la región Amazónica. Las emisiones acumuladas de gases de efecto invernadero en el presente contribuyen a la expansión acelerada del hongo en el futuro, sobre todo en zonas más vulnerables de la Amazonía.

Palabras claves: Agricultura, *Fusarium* spp, nicho ecológico, modelación, distribución geográfica, mal de Panamá.

ABSTRACT

The pathogen *Fusarium oxysporum* F.sp. *cubense*, is the cause of Panama disease transmitted from the soil to the crop. Together with climate change, it is one of the main non-negotiable influences on biodiversity, causing imbalance in the welfare of banana production. This research project aims to evaluate changes in the potential geographic distribution of *Fusarium oxysporum* F.sp. *cubense* in continental Ecuador under climate change scenarios. In this sense, information on the expansion of the fungus in different regions of Ecuador was investigated and analyzed using the NicheToolBox platform, taking into account climatic variables and scenarios of representative concentration trajectories (RCP). The Maxent maximum entropy algorithm was used to model the climatic niche of the species. According to the present and future potential geographic distribution, the species is distributed towards areas of the Sierra region with the highest suitability index, followed by the Coast. The greatest influence on the present and future potential distribution of the pathogen corresponds to the monthly temperature variables in a range of 2.5°C to 24°C. On the other hand, it was determined that under the climate change scenarios, the greatest expansion is found in the extreme scenario (RCP 8.5) with 33997.46 km² by 2070; there would be a greater expansion in the Amazon region. The accumulated emissions of greenhouse gases in the present contribute to the accelerated expansion of the fungus in the future, especially in more vulnerable areas of the Amazon.

Key words: Agriculture, *Fusarium* spp, ecological niche, modeling, geographic distribution, Panama disease.

TABLA DE CONTENIDO

Índice

Título del Proyecto de Investigación:	i
DECLARACIÓN DE AUTORIA Y CESIÓN DE DERECHOS.....	ii
CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.....	iii
CERTIFICADO DE APROVACIÓN POR TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	v
AGRADECIMIENTO	vi
RESUMEN	vii
ABSTRACT.....	viii
TABLA DE CONTENIDO.....	ix
CÓDIGO DUBLIN	xiii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.1. Problema de investigación.....	4
1.1.1. Planteamiento del problema	4
1.1.2. Formulación del problema	5
1.1.3. Sistematización del problema.....	5
1.2. Objetivos	6
1.2.1. Objetivo General	6
1.2.2. Objetivos Específicos.....	6
1.3. Justificación.....	7
CAPÍTULO II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN	8
2.1. Marco conceptual.....	9
2.1.1. <i>Fusarium oxysporum</i>	9
2.1.2. Historia	10

2.1.3. Biología	10
2.1.4. Impacto económico	12
2.1.5. Nicho Ecológico	13
2.1.6. Herramientas para predicciones de distribución de especies	15
2.1.7. Modelo de distribución de especie con Maxent	16
2.2. Marco referencial.....	18
2.2.1. Análisis de expansión de <i>Fusarium oxysporum</i>	18
2.1.3. <i>Fusarium oxysporum</i> y el cambio climático	19
2.1.4. Estudios realizados con Maxent	20
2.1.5. Antecedentes para Ecuador	21
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	23
3.1. Localización.....	24
3.2. Tipo de investigación	24
3.2.2. Experimental.....	25
3.2.3. Descriptiva.....	25
3.3. Métodos de investigación.....	25
3.4.1. Fuentes primarias	26
3.4.2. Fuentes secundarias.....	27
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	33
4.1.1. Modelar el nicho climático de <i>Fusarium oxysporum</i> F. sp. <i>cupense</i> en Ecuador continental	34
4.1.2. Caracterizar la distribución geográfica potencial de <i>Fusarium oxysporum</i> F. sp. <i>cupense</i> en Ecuador continental en el presente y ante escenarios de cambio climático	37
4.1.3. Identificar las ganancias, pérdidas o la estabilidad en la distribución geográfica potencial del patógeno entre el presente y los escenarios de cambio climático	43

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	48
5.1. Conclusiones	49
5.2. Recomendaciones	50
BIBLIOGRAFÍA	51
ANEXOS.....	60

Índice de tablas

Tabla 1. Variables bioclimáticas disponibles en Worldclim.	17
Tabla 2. Variables más importantes según su influencia sobre <i>Fusarium oxysporum</i> F. sp. cubense identificadas a través de cinco métodos.	28
Tabla 3. Análisis de contribución de las variables climáticas al modelo de nicho climático de <i>Fusarium oxysporum</i> F. sp. cubense en Ecuador continental.	35
Tabla 4 . Extensión (km ²) de la distribución geográfica de <i>Fusarium oxysporum</i> F. sp. cubense en las diferentes regiones de Ecuador continental para el presente y en escenarios de cambio climático. Entre paréntesis se incluye el porcentaje que representa la extensión respecto a la distribución total para el escenario correspondiente.	40
Tabla 5. Variaciones en la extensión (km ²) de la distribución geográfica potencial de <i>Fusarium oxysporum</i> F. sp. cubense en diferentes escenarios de cambio climático.	44

Índice de figuras

Figura 1. Esquema del diagrama de BAM.....	15
Figura 2. Mapa de Ecuador continental.....	24
Figura 3. Registros de presencia de <i>Fusarium oxysporum</i> F.sp. cubense obtenidos para la modelación a nivel mundial.	30
Figura 4. Comportamiento de la probabilidad de encontrar condiciones adecuadas para <i>Fusarium oxysporum</i> F sp. cubense en Ecuador continental según las variaciones de la temperatura máxima media del periodo más cálido (°C), temperatura promedio anual	

(°C), precipitación anual (mm). Los valores de temperatura están multiplicados por 10.	36
Figura 5. Nicho conocido de <i>Fusarium oxysporum</i> representado en el espacio ambiental con las variables climáticas de mayor aporte al modelo de nicho ecológico generado con Maxent.	37
Figura 6. Mapas de Probabilidad de Distribución para el presente y futuro de <i>Fusarium oxysporum</i> F. sp. cubense en Ecuador continental para los años 2050, 2070 en escenario de mitigación (RCP 2.6), escenario moderado (RCP 4.5) y otro extremo (RCP 8.5). ...	41
Figura 7. Mapas de Distribución potencial para el presente y futuro de <i>Fusarium oxysporum</i> F. sp. cubense en Ecuador continental para los años 2050, 2070 en escenario de mitigación (RCP 2.6), escenario moderado (RCP 4.5) y otro extremo (RCP 8.5). ...	42
Figura 8. Regiones de expansión y contracción de la distribución geográfica potencial de <i>Fusarium oxysporum</i> F. sp. cubense en el y futuro (2050 y 2070), bajo escenarios de mitigación (RCP 2.6), moderado (RCP 4.5) y extremo (RCP 8.5).....	45

Índice de anexos

Anexo 1. Países donde se encuentra registros en línea de <i>Fusarium oxysporum</i>	60
Anexo 2. Análisis de correlaciones entre los valores de las variables bioclimáticas de los puntos de presencia de la especie <i>Fusarium oxysporum</i> F.sp. cubense.	60

CÓDIGO DUBLIN

Título:	Análisis de riesgo de expansión de <i>Fusarium oxysporum</i> F.sp. <i>cubense</i> ante el cambio climático en Ecuador continental.
Autor:	Barahona Manzaba, Domenica Gabriela
Palabras clave:	Agricultura, <i>Fusarium</i> spp, nicho ecológico, modelación, distribución geográfica, mal de panamá.
Fecha de publicación:	Mayo, 2021
Editorial:	Universidad Técnica Estatal de Quevedo (UTEQ), Quevedo 2021.
Resumen:	Resumen. - El patógeno <i>Fusarium oxysporum</i> F.sp. <i>cubense</i>, es causante de la enfermedad mal de Panamá transmitida desde el suelo hacia el cultivo. Junto con el cambio climático es una de las principales influencias no negociables en la biodiversidad, que provoca desequilibrio en el bienestar de la producción bananera. Este proyecto de investigación tiene como objetivo evaluar los cambios en la distribución geográfica potencial de <i>Fusarium oxysporum</i> F.sp. <i>cubense</i> en Ecuador continental ante escenarios de cambio climático. En este sentido, se investigó y analizó información mediante la plataforma NicheTooBox sobre la expansión del hongo en diferentes regiones del Ecuador, teniendo en cuenta variables climáticas y escenarios de RCP. Abstract. - The pathogen <i>Fusarium oxysporum</i> F.sp. <i>cubense</i>, is the cause of Panama disease transmitted from the soil to the crop. Together with climate change, it is one of the main non-negotiable influences on biodiversity, causing imbalance in the welfare of banana production. This research project aims to evaluate changes in the potential geographic distribution of <i>Fusarium oxysporum</i> F.sp. <i>cubense</i> in continental Ecuador under climate change scenarios. In this sense, information on the expansion of the fungus in different regions of Ecuador was

	investigated and analyzed using the NicheToolBox platform, taking into account climatic variables and scenarios of representative concentration trajectories (RCP).
Descripción:	
URI:	

INTRODUCCIÓN

El patógeno *Fusarium oxysporum* F. sp. *cubense*, más conocido como la enfermedad de Panamá y que la padece el plátano, es una de las principales limitantes en la producción de banano en todo el mundo. Maryani (1), indica que, la aparición de *Fusarium* se remonta al siglo 20, cuando esta enfermedad eliminó miles de hectáreas del banano Gros Michel, el favorito de Centroamérica. El brote evolucionó hasta convertirse en una de las peores epidemias de plantas de todos los tiempos. La marchitez por *Fusarium* es transmitida a través del suelo y se considera como una de las enfermedades más destructivas del banano a nivel mundial.

En este sentido, vale indicar que los organismos que causan enfermedades son muy importantes en el ecosistema y pueden dañar la salud humana y animal o afectar cultivos de importancia económica a escala mundial. El conocimiento de estas especies es fundamental para aportar soluciones que eviten los efectos de estas infestaciones microbianas. Por ello, el Centro de Investigaciones Biotecnológicas del Ecuador (CIBE) ha iniciado investigaciones de campo, encaminadas a identificar patógenos que afectan los cultivos de tomate, sandía y banano, recolectando muestras de plantas que presenten síntomas de enfermedades, para luego ser analizadas en el laboratorio para identificar los agentes causales (2).

Por otro lado, las características climáticas y geográficas en Ecuador, han sido consideradas como condiciones adecuadas para el crecimiento de este patógeno. Sin embargo, ante el clima cambiante y el calentamiento global, se esperan cambios en la distribución de muchas especies, las más tolerantes podrían expandir su distribución y las más susceptibles perecerían. Bajo este contexto, analizar cómo podría distribuirse este patógeno en los cultivos del Ecuador, limitaría las futuras pérdidas económicas si se tuviese visualizado en cuáles zonas existirían mayores probabilidades de aparición del patógeno, debido a la presencia de condiciones climáticas óptimas para la presencia de la especie. Los escenarios de cambio climático son herramientas útiles para la evaluación de impactos, iniciativas de adaptación, mitigación y creación de modelos climáticos.

Estos se proyectan en el tiempo para predecir la unidad de hábitat en las que se podrían encontrar las especies (3).

Desde esta perspectiva, es importante señalar que, la investigación y el conocimiento de la variabilidad climática y los procesos de cambio climático son desafíos para la planificación local y el desarrollo sostenible en Ecuador. También es un desafío generar datos e información con un alto grado de rigor científico; ya que, permite comprender la distribución de especies relacionadas con el cambio climático y el impacto de sus efectos, y de esta manera predecir y ver la evolución de estos cambios, identificando los respectivos métodos de solución (4).

En definitiva, los cultivos y las plagas ante el cambio climático están produciendo grandes consecuencias en el Ecuador, siendo el cambio climático uno de los factores que causa mayores pérdidas en la producción agrícola; reflejándose tanto en la parte social, como ecológica y económica. Por ello, es importante realizar investigaciones que puedan aportar con información acertada sobre el crecimiento potencial que tendrían las distribuciones geográficas específicas de patógenos, en relación a los escenarios climáticos en Ecuador.

CAPÍTULO I. CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1.Problema de investigación

1.1.1. Planteamiento del problema

La marchitez por *Fusarium*, es una enfermedad provocada por el patógeno *F. oxysporum* F. sp. *cubense* transmitido desde el suelo hacia el cultivo, que, junto con el cambio climático, se convierten en dos problemáticas severas que atentan contra el bienestar y equilibrio de la producción bananera. Ante esta situación: ¿Cómo podríamos apoyarnos de la información disponible sobre las variables bioclimáticas, a fin de desarrollar modelos de predicción que puedan indicar cuáles son las áreas de mayor riesgo ante expansiones de los patógenos y enfermedades en el futuro? Por lo tanto, si se toma en cuenta la información que se tiene sobre la presencia de *Fusarium* en la zona de Ecuador continental y en la producción agrícola nacional, se podrían diseñar modelos predictivos como medidas preventivas que aporten soluciones enfocadas a la preservación de la producción bananera.

Diagnóstico

La enfermedad ocasionada por *F. oxysporum* F. sp. *cubense* o también conocida como el Mal de Panamá, ataca principalmente a los cultivos de plátano, impidiendo el paso de nutrientes al pseudotallo, lo que posteriormente causa marchitez y muerte en la planta. A esto se le suma el hecho de que, el cambio climático empeore la sostenibilidad de los ecosistemas agropecuarios y la productividad agrícola al crear nuevas áreas con condiciones adecuadas para especies tolerantes como los patógenos. Por esta razón, es necesario realizar un monitoreo constante en los sistemas agrícolas, de modo que se logren conocer los efectos que genera el cambio climático sobre ellos y las posibilidades de adaptación de *Fusarium* ante estos cambios, lo que a su vez permitiría conocer la forma en que se modifica la distribución del patógeno en nuevas áreas geográficas.

Pronóstico

La afectación a los cultivos por parte de *F. oxysporum* F. sp. *cubense*, es un serio problema ecológico y ambiental que, al no ser tratado, también se convierte en un problema social y económico para el país. Esta situación se exagera con el cambio climático, el cual es una problemática que se vive a nivel mundial y que se predice que favorecerá a las plagas y enfermedades, lo que provocaría mayores pérdidas económicas y problemas de productividad agrícola y seguridad alimentaria. Por ello, es importante conocer las consecuencias que se puedan tener a futuro a causa de una potencial ampliación en la distribución de este patógeno, generando las medidas oportunas para la mitigación patógeno, manejo de los cultivos y conocer aquellas áreas vulnerables a los efectos del cambio climático.

1.1.2. Formulación del problema

La marchitez que ocasiona *Fusarium oxysporum* F. sp. *cubense*, ha sido la enfermedad más destructiva que se conoce hasta ahora para el cultivo de plátano. No obstante, la mejor opción para evitar el impacto de esta en una región, es impedir su entrada; ya que, una vez que esta plaga invade una zona, se necesita de la aplicación de medidas fitosanitarias severas para erradicar la transferencia del patógeno de áreas infectadas hacia áreas sanas. Estas acciones se consideran de alto costo y estrictas, además de que suponen la intervención de profesionales capacitados para llevar a cabo el reconocimiento del patógeno y así poder brindarle un manejo adecuado. Ante esta situación se plantea la siguiente interrogante: ¿Existirán cambios en la distribución potencial de *Fusarium oxysporum* F. sp. *cubense* ante la influencia del cambio climático?

1.1.3. Sistematización del problema

- ✓ ¿Cuáles son los factores bioclimáticos que determinan la distribución potencial de *Fusarium oxysporum* F. sp. *cubense* en Ecuador continental?
- ✓ ¿Cómo se describe la distribución de *Fusarium oxysporum* F. sp. *cubense* en el presente y en escenarios de cambio climático?

- ✓ ¿Cuáles serían las áreas más afectadas por la expansión de *Fusarium oxysporum* F. sp. *cubense* en Ecuador continental en escenarios de cambio climático?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Evaluar los cambios en la distribución geográfica potencial de *Fusarium oxysporum* F. sp. *cubense* en Ecuador continental ante escenarios de cambio climático.

1.2.2. Objetivos Específicos

- ✚ Modelar el nicho climático de *Fusarium oxysporum* F. sp. *cubense* en Ecuador continental;
- ✚ Caracterizar la distribución geográfica potencial de *Fusarium oxysporum* F. sp. *cubense* en Ecuador continental en el presente y ante escenarios de cambio climático;
- ✚ Identificar las ganancias, pérdidas o la estabilidad en la distribución geográfica potencial del patógeno entre el presente y los escenarios de cambio climático.

1.3. Justificación

La importancia del patógeno *Fusarium oxysporum* F.sp. *cubense* radica en el impacto negativo que tiene sobre los cuatro mayores productores de banano en América Latina. Este patógeno es una amenaza para la seguridad alimentaria, la economía y la producción agrícola. A esto se le suma que, el cambio climático repercute negativamente en la producción de las plantaciones, y se supone que propicia la expansión de especies tolerantes a cambios ambientales como ocurre con los patógenos.

Ante esta situación, Ecuador continental no cuenta con investigaciones referentes al tema, que permitan predecir las futuras zonas de riesgo por la expansión de *F. oxysporum* F.sp. *cubense*. Por ello, esta investigación aporta información base relevante, con la evaluación del nicho y caracterización de la distribución geográfica de *F. oxysporum* F. sp. *cubense* ante los escenarios de cambio climático. A partir de esta información, se pueden establecer nuevas estrategias de manejo y gestión en uno de los productos de exportación más importantes del país como lo es el banano.

CAPÍTULO II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Marco conceptual

2.1.1. *Fusarium oxysporum*

De acuerdo a Barros (5), el género *Fusarium* es un patógeno distribuido ampliamente a nivel mundial en más 32 países que afecta a más de 80 cultivos de importancia comercial, como plátano, el tomate y la cebolla. A pesar de que existen diversas especies del género *Fusarium*, las más relevantes para los cultivos son *Fusarium oxysporum* y *Fusarium solani*.

Por su parte, Urías (6) señala que, esta enfermedad es conocida como marchitez y se presenta en distintos cultivos como: plátano, tomate, pimiento y ají picante; y aunque existen varios tipos de *Fusarium*, los síntomas son los mismos en todas sus variantes. Vale destacar que, este hongo se reproduce mejor en climas cálidos y la temperatura óptima para su desarrollo oscila los 2°C; por lo que, al encontrarse en ambientes con temperaturas muy cálidas o muy frías, su propagación se vuelve más lenta (5).

Consecuentemente, Hernández, Pineda y Noriega (7) indican que, *Fusarium oxysporum* vive en el suelo y desde este es capaz de transmitirse hasta los cultivos; además, puede sobrevivir hasta tres años, viviendo como hospedero en los desechos de las plantas vivas en estado de enfermedad. Este hongo también se puede transmitir por medio de terrenos contaminados por plantas, semillas y materiales previamente infectados. Asimismo, suelos con pH ácido y textura arenosa son favoritos para el hongo, de la misma forma suelos con condiciones de humedad (8).

Asimismo, respecto al estudio del *Fusarium oxysporum* F. sp. *cubense*, se ha evidenciado que, esta cepa especial se dispersa y expande ampliamente por medio de residuos de banano que han sido infectados, uso de herramientas agrícolas no desinfectadas que han estado en contacto con el patógeno o con residuos infectados, por medio del riego en los cultivos, de la lluvia que transporta las esporas infectadas a nuevas áreas de cultivos, por el trasplante de una planta infectada a una nueva área sana y además este hongo puede infectar las raíces de plantas no hospedantes y sobrevivir allí de una forma saprófita durante muchos años (9) (10).

2.1.2. Historia

Según el Instituto Colombiano Agropecuario (11), se conocen 4 razas de este tipo de hongo, tres de las cuales tienen como hospedantes el banano y el plátano. Entre los años 1920 y 1950, una de las primeras razas identificadas de *Fusarium oxysporum* ocasionó uno de los contagios más devastadores, erradicando una elevada superficie de cultivos de “Gros Michel”; que, para ese entonces, fue el principal banano de exportación en los países de América Latina y El Caribe. Para fortuna de estas regiones, la epidemia fue superada mediante el uso de cultivos resistentes como el “Cavendish”, que luego de estos eventos se posicionó como el tipo de banano de mayor exportación a nivel mundial (12).

Sin embargo, para la década de 1990 y cuando se creyó que el problema estaba resuelto, se reportó en Taiwán una raza más agresiva de *Fusarium* denominada raza 4 tropical (Foc R4T), afectando cultivares Cavendish y la cual en un periodo de 12 años alcanzó una afectación de 1.200 Ha (11). A partir de ese entonces, la raza Foc R4T se distribuyó por varios países del mundo como: Indonesia, Malasia, Filipinas, China, Norte de Australia, India, Pakistán, Jordania, Israel, Líbano y Mozambique. En la actualidad, la enfermedad está presente en 19 de los 135 países productores de musáceas, estimándose que más de 100.000 hectáreas ya están afectadas por la enfermedad (7).

2.1.3. Biología

Fusarium oxysporum es un hongo que se presenta principalmente como saprófito en el suelo, o también como patógeno especializado, denominado forma especial (f.sp.), según la planta hospedante que afecte (13). Asimismo, es posible distinguir pato tipos o razas fisiológicas a partir de una misma forma especial, sobre todo cuando el hongo ataca alguna determinada especie vegetal; además, pueden ser detectadas incluso en poblaciones clonales al analizar características moleculares (14).

Caligiore, Valdéz, Piccolo y Galmarini (15) manifiestan que, el taxón forma especial (f.sp) hace referencia a las cepas que poseen características morfológicas y de cultivo indistintas, pero presentan distintos componentes fisiológicos en su destreza para infectar

un cultivo determinado. Siendo así que, este taxón se ha empleado para categorizar aislamientos que causan enfermedades en una especie, género o familia, en particular.

Para Chehri, Salleh y Zakaria (16), las formas especiales de *Fusarium oxysporum* se subdividen en razas fisiológicas, con base en su especificidad patogénica sobre determinadas variedades de una misma especie de planta, razón por la cual las pruebas de patogenicidad y las características de virulencia de los aislamientos del hongo son el principal criterio para diferenciar sus formas especiales de y sus razas fisiológicas. Además, Berruezo (17) argumenta que, el conocimiento sistemático de *Fusarium oxysporum* ha aumentado con técnicas como el polimorfismo de isoenzimas. En este contexto diversos autores reportan polimorfismo principalmente para la aril esterasa, teniendo la oportunidad de distinguir mediante este método formas especiales y los diferentes tipos de razas de *Fusarium oxysporum*.

2.1.3.1. Agente causal de la enfermedad

De acuerdo a Sánchez (18), la producción mundial de banano y plátano se encuentra amenazada por una nueva raza del hongo *Fusarium oxysporum* F. sp. *cubense* (Foc) raza que es la causante de la marchitez en los cultivos. Cabe señalar que, Foc es realmente destructor por el hecho de que provoca síntomas de marchitez hasta la muerte del cultivo, permaneciendo durante años en el suelo y haciendo más complicado su manejo.

Asimismo, Clavijo (12) menciona que, al no existir opciones de control, la Enfermedad de Panamá se considera la más importante en el sistema productivo del banano, con especial atención en regiones de Latinoamérica y el Caribe. Esta enfermedad es extremadamente destructiva y, en el siglo pasado, causó una epidemia que devastó la industria bananera basada en “Gros Michel-AAA” (19).

2.1.3.2. Síntomas

Según Barros (5), el amarillamiento de las hojas es uno de los primeros síntomas, en donde las hojas bajas comienzan a perder turgencia y a “colgarse”. Además, esta enfermedad afecta el sistema vascular, y al cortar el tallo longitudinalmente se puede

observar manchas de color marrón oscuro o café. Por lo tanto, antes de notarse los efectos de la marchitez en las plantas maduras, aparecen los efectos físicos en el desarrollo de los frutos y flores.

Además, se puede apreciar un enanismo en los brotes y reducción en el desarrollo de la planta. De esta forma, los síntomas de la enfermedad avanzan afectando la planta hacia arriba hasta causar un marchitamiento generalizado y la muerte total de la misma (20). Según Maymon (21), un aspecto muy importante para el diagnóstico de la enfermedad que la diferencia fácilmente de otras enfermedades vasculares es una coloración amarilla o marrón en los haces vasculares y desprendimiento en los tejidos que no afectan la médula.

Por otro lado, Ordoñez (22) sostiene que, los síntomas que produce este Fito patógeno son marchitamiento, debido al debilitamiento de los peciolo, retardo en el crecimiento, pudrición radicular, observándose en la parte basal del tallo un anillo con coloración café y rojiza. Generalmente, este patógeno puede diseminarse en el agua de riego, siendo el de más relevancia el riego por gravedad, lo cual hace que el hongo termine contaminando a todo el suelo en donde se encuentra el cultivo.

2.1.4. Impacto económico

De acuerdo a Aquino, Bandoles y Lim (23) los datos oficiales sugieren que la pérdida total en el comercio de bananos Gros Michel, en ese entonces, ascendía a un aproximado de 2 300 millones de dólares. Debido a la permanencia en el suelo del hongo durante varias décadas, los bananos Gros Michel, prácticamente, siguen estando ausentes en los mercados mundiales de exportación hasta la fecha. Debido a la longevidad del hongo en el suelo, las tierras infectadas no pueden utilizarse para plantaciones de bananos u otros cultivos durante décadas, generando un cambio de producción hacia tierras nuevas y no afectadas como único recurso (24).

Debido al alto riesgo de la distribución del patógeno, los brotes pueden ocasionar que más suelos se contaminan con la enfermedad. En todos los casos reportados, una vez que se ha contaminado una finca, el manejo de la enfermedad se ha demostrado extremadamente

difícil y costoso. Esto representa una amenaza particular para los medios de vida de los pequeños productores de bananos en las regiones afectadas, quienes a menudo carecen de medios financieros para implementar medidas frente a la reducción del rendimiento a la par del aumento de los costos de producción (25).

2.1.5. Nicho Ecológico

El concepto más relevante de nicho ecológico hace referencia al conjunto de caracteres ambientales del que un ser vivo depende para subsistir. Siendo así que, existen varios métodos diseñados para la generación de nichos ecológicos; los cuales, en su gran mayoría, corresponden a algoritmos empíricos y con poca formalidad matemática (26). Para Coppini (27), al hablar de características de los organismos y el medio en el que se encuentran, emplea el término nicho ecológico, el cual corresponde a la posición relacional o funcional de una especie o población dentro de un ecosistema.

Por su lado Mark (28) argumenta que, un nicho ecológico es la forma de subsistencia que utilizan las diferentes especies para poder alimentarse, competir con otras especies, poder cazar, evitar ser alimento de otros, etc. En otras palabras, un nicho representa al conjunto de variables ambientales, naturales y ecológicas, que permiten describir los elementos específicos que necesita una especie para su supervivencia. Razón por la cual, un nicho no debe considerarse solo como el entorno, sino como el conjunto de características del ambiente que contribuyen a la satisfacción de las necesidades genéticas de los organismos. Por otro lado, los tipos de nicho ecológico se describen de acuerdo con los criterios detallados que se muestran a continuación:

- **Nicho ecológico real**

Está condicionado por el tipo de vida y recursos que una especie utiliza en un hábitat, incluyendo las relaciones con depredadores y competidores.

- **Nicho fundamental o ecológico potencial**

Corresponde a todo el espacio que potencialmente puede ocupar una especie según sus características propias, sin incluir las interacciones con el resto de especies (27).

Es así que, los modelos de predicción que generan los nichos ecológicos sobre algunas especies, se enfocan principalmente en analizar las condiciones ambientales de los entornos con aspectos ya conocidos. Es por ello que, la finalidad de la modelación es predecir si un entorno ambiental es idóneo para una especie determinada, en función de su nicho ecológico.

2.1.5.1 Diagrama de BAM

El diagrama BAM (Figura 1) es una representación idealizada del espacio geográfico G , donde se ilustran diferentes regiones. Los puntos que se encuentran rellenos muestran la incidencia de las poblaciones, denotadas por G^+ que, generalmente van a depender de la calidad que ha tenido el muestreo. Los círculos que se muestran abiertos corresponden a las poblaciones, en donde todo tipo de algoritmo de correlación ejerce función sobre los puntos abiertos y rellenos (29).

Por otra parte, el diagrama BAM muestra que una especie tiene altas probabilidades de ser observada en aquellas regiones del planeta donde: existan las condiciones abióticas necesarias y existan las condiciones bióticas favorables. Por definición, las variables ambientales en G_0 constituyen el nicho realizado (N_R). La zona GI es una región con condiciones favorables pero que se ha mantenido fuera de las capacidades de dispersión de la especie (30).

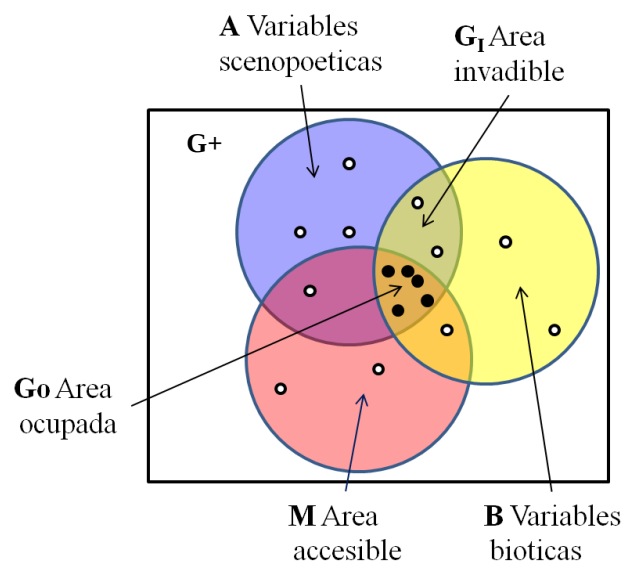


Figura 1. Esquema del diagrama de BAM.

Fuente: Soberón, Osorio y Peterson (30).

2.1.6. Herramientas para predicciones de distribución de especies

Estos modelos se usan más comúnmente en biogeografía como predicciones o modelos del área geográfica de un taxón que luego se pueden usar para identificar patrones biogeográficos, los que conducen a proponer regionalizaciones biogeográficas. En la actualidad existen cada vez más tipos de técnicas utilizadas como herramientas para la modelación de nichos ecológicos. Se han desarrollado varios modelos que ayudan a comprender algunas de las dimensiones ambientales y ecológicas en las que se encuentra en taxón, principalmente aquellas relacionadas con factores abióticos (precipitación, temperatura, entre otras), entre los cuáles se encuentran (31):

- BIOCLIM (Bioclimatic Envelope Algorithm).
- GARP (Genetic Algorithm for Rule-set Prediction).
- Maxent (Maximum Entropy): Maxent se basa en el concepto de máxima entropía y utiliza métodos mecánicos para hacer predicciones a partir de información incompleta. Maxent estima la distribución más uniforme de toda el área de estudio y

limita el valor esperando de cada variable ambiental en la distribución para que sea consistente con su promedio empírico, es decir, el promedio del conjunto de datos (32).

2.1.7. Modelo de distribución de especie con Maxent

El modelo Maxent es fundamental para la distribución de especies, es básicamente correcto, las condiciones ambientales apropiadas para estas especies pueden ayudar a determinar dónde se encuentra un sitio de orientación espacial que cumple con las condiciones para la especie en estudio.

El uso de esta aplicación combinada con herramientas SIG, es de muchas ayuda en la generación de mapas de distribución potencial y actual para las especies nativas, por lo que resulta fundamental tanto para evaluar el estado de conservación de las especies, como también para evaluar potenciales lugares para desarrollar iniciativas de conservación y restauración (33).

2.1.7.1. Relación con las variables climáticas

Maxent permite determinar o predecir cómo se distribuye una especie o un grupo de especies ante cambios ambientales de temperatura, humedad, entre otros. El cambio climático no solo afecta las actividades económicas o conservación de especies, pero también la salud humana. Maxent se ha utilizado en estudios de distribución de enfermedades tropicales como la leishmaniosis, contra cambios potenciales en el clima (33).

Las proyecciones de cambios en el sistema climático se realizan empleando una jerarquía de modelos climáticos, así como modelos del sistema terrestre. Estos modelos simulan cambios basados en un conjunto de forzamientos antropogénicos. Para las simulaciones del nuevo modelo climático, se utiliza un nuevo conjunto de escenarios: las trayectorias de concentración representativas (RCP).

Worldclim es una base de datos con variables de cambio climático, abierto y libre, que ha permitido un desarrollo exponencial de los trabajos sobre biogeografía, macro ecología y cambio climático en los últimos 10 años. Worldclim permite la descarga de 19 variables climáticas (tabla 1), a diferentes formatos raster (que son formatos GIS, es decir, una matriz de datos georreferenciados). Además permite la interpolación de datos a nivel global de las estaciones climáticas desde el año 1950 al 2000 (34).

Tabla 1. Variables bioclimáticas disponibles en Worldclim.

VARIABLE BIOCLIMA	SIGNIFICADO		
		BIO10	Temperatura promedio del trimestre más caliente (°C).
BIO1	Temperatura promedio anual (°C).	BIO11	Temperatura promedio del trimestre más frío (°C).
BIO2	Rango diurno promedio (promedio mensual (temperatura máxima – temperatura mínima)) (°C).	BIO12	Precipitación anual (mm).
BIO3	Isotermalidad (°C) (P2/P7) (* 100)	BIO13	Precipitación del mes más húmedo (mm).
BIO4	Temperatura estacional (desviación estándar *100)	BIO14	Precipitación del mes más seco (mm).
BIO5	Temperatura máxima del mes más cálido (°C).	BIO15	Precipitación estacional (coeficiente de variación en %)
BIO6	Temperatura mínima del mes más frío (°C).	BIO16	Precipitación en el trimestre más húmedo (mm).
BIO7	Rango de temperatura anual (P5-P6)	BIO17	Precipitación en el trimestre más seco (mm).
BIO8	Temperatura promedio del trimestre más húmedo (°C).	BIO18	Precipitación en el trimestre más caliente (mm).
BIO9	Temperatura promedio del trimestre más seco (°C).	BIO19	Precipitación en el trimestre más frío (mm).

Fuente: Hijmans et al (34).

2.2. Marco referencial

2.2.1. Análisis de expansión de *Fusarium oxysporum*

Fusarium oxysporum forma parte de la comunidad de hongos que se encuentran en el suelo y se considera como un elemento natural de la rizósfera. Las cepas de esta especie son saprófitas y pueden llegar a vivir en la materia orgánica, aunque algunas como las fitopatógenas penetran las raíces de la planta, lo que provoca la marchitez vascular. Actualmente, se conocen alrededor de 150 formas especiales de este hongo, junto a sus razas fisiológicas; además, de evidenciarse su rápida expansión en los diferentes cultivos del medio. Asimismo, se ha manifestado que, *F. oxysporum* es un fitoatógeno del suelo que se distribuye acelerada y ampliamente en las áreas de varios cultivos como: tomate, césped, palma de aceite, chícharo, algodón, plátano, pino blanco, entre otros (75, 66, 67 y 10).

Con base en lo expuesto, se han desarrollado varios trabajos en donde se analizó la marchitez de los cultivos causada por *F. oxysporum*, el mismo que se encontró distribuido ampliamente en todas las áreas de los cultivos analizados. Además, se ha podido evidenciar que, debido al uso inadecuado de plaguicidas y la capacidad del hongo de ser resistente a estos, el desarrollo de la enfermedad se da de forma más acelerada (35) (36).

Por otro lado, respecto al estudio de *Fusarium oxysporum* F. sp. *cubense*, se ha evidenciado que, esta cepa especial se dispersa y expande ampliamente por medio de residuos de banano que han sido infectados por el uso de herramientas agrícolas no desinfectadas, que han estado en contacto con el patógeno o con residuos infectados, por medio del riego en los cultivos, de la lluvia que transporta las esporas infectadas a nuevas áreas de cultivos, por el trasplante de una planta infectada a una nueva área sana. Además, este hongo puede infectar las raíces de plantas no hospedantes y sobrevivir allí de una forma saprófita durante muchos años (9) (10).

En el año 2019, los trabajadores de una gran plantación de bananos en Colombia identificaron síntomas alarmantes en este cultivo, alertando a las autoridades fitosanitarias nacionales de Colombia. Posteriormente, se realizaron las pruebas iniciales

correspondientes a la reacción en cadena de la polimerasa para el ADN del patógeno *Fusarium* dando positivo; ante lo cual, el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) implementó su primer Plan de Contingencia, en el que incluyó el cierre de cuatro granjas y la destrucción de todos los cultivos dentro de 10 m² en donde se habían tomado las muestras y dieron positivo. Es así que, las autoridades del ICA ubicaron estaciones de control para descontaminar los vehículos, ropa, botas y demás implementos de los trabajadores de este sector; ampliando el monitoreo de la enfermedad hasta 1100 ha, con el fin de controlar el avance de la enfermedad (10) (37).

2.1.3. *Fusarium oxysporum* y el cambio climático

Los efectos del cambio climático sobre los cultivos y patógenos que se encuentran en el suelo como *Fusarium oxysporum*, se deben comprender para poder pronosticar las variaciones pertinentes respecto al manejo agrícola y los ecosistemas. Esto se debe a que, las modificaciones en tiempo y espacio que ocurren en el clima, ayudan a producir respuestas de resistencia en los patógenos que se encuentran en el suelo. Además, se ha comprobado que, la agricultura debido a su dependencia de las condiciones climáticas, se ha visto afectada seriamente por las consecuencias del cambio climático; no obstante, la gravedad de estas consecuencias dependen del tipo de cultivo, las condiciones climáticas y las condiciones de suelo que existan en el área de estudio (38) (39).

En concordancia con lo citado, se señalan las complicaciones generadas por las interacciones entre hospedero, patógeno y clima. En varias investigaciones se demostró que, la diversidad del patógeno, la especificidad del ataque y la secuencia del estrés en la planta; son inducidas principalmente por la variación del clima, haciendo más susceptible al hospedero y aumentando el nivel de daño del patógeno en los cultivos. Asimismo, respecto al componente clima dentro del proceso epidemiológico de la marchitez por *Fusarium*, se pudo evidenciar que, la humedad y la temperatura del suelo son los dos factores fundamentales para regular los ciclos de infección de este hongo (40) (41).

En otras investigaciones (35) (42) se logró determinar la relación entre la zona de riesgo por marchitez y los índices bioclimáticos del monitoreo en varios cultivos de agave durante 3 años. Siendo así que, en estos estudios se evidenció que, durante el primer año

hubo un aumento en la superficie del 23,3% del nivel de riesgo, en el segundo año el 50,5% de la superficie se conservó sin modificaciones y durante el tercer año el 26,2% de la superficie redujo su nivel de riesgo, por lo que se concluyó que, los efectos del cambio climático influyen en las zonas de riesgo por marchitez; por lo cual, recomiendan utilizar escenarios futuros de cambio climático que permitan proyectar la tendencia de estas modificaciones en las zonas de riesgo por *Fusarium* (35) (42).

En lo que respecta al país, la utilización de herramientas de modelación del comportamiento de especies patógenas y su proyección ante escenarios de cambio climático, ha sido muy poco estudiada. Aun así, existen muchos hongos y patógenos como *Fusarium oxysporum*, que son amenazas potenciales para los ecosistemas, las especies y cultivos locales y nacionales, por lo tanto un riesgo significativo para la seguridad alimentaria, y no están siendo estudiados desde este punto de vista predictivo para tener elementos científicos que sustenten sistemas de prevención y cambios en las técnicas de manejo de cultivos importantes.

2.1.4. Estudios realizados con Maxent

La selección del método de modelación es un paso crítico en el proceso conocer o predecir las distribuciones idóneas de las especies. Es por ello que, en varios estudios realizados sobre la distribución potencial y el estado de conservación de las especies, se ha logrado establecer predicciones de la distribución y expansión de varias especies haciendo uso del Software Maxent; logrando así obtener un análisis predictivo mediante archivos cartográficos con características determinadas. Vale resaltar que, según las investigaciones desarrolladas, uno de los beneficios de la modelación de especies usando Maxent y sus entornos, radica en la posibilidad de modelar escenarios futuros con muestras de datos parciales o incompletos (68, 74 y 69).

En cuanto a nichos ecológicos, se conoce que su modelado es una herramienta importante para la evaluación de la distribución espacial de especies terrestres, por lo que existen varias investigaciones que han generado modelos de predicción basados en el concepto de nicho ecológico MAXENT; empleando un Modelo Digital de Elevación, para lo cual se han utilizado los registros de presencia obtenidos de diferentes bases de datos

disponibles de las áreas de estudio (43). Asimismo, en otras investigaciones se han utilizados métodos correlativos que utilizan algoritmos en Maxent, con el fin de estimar el nicho ecológico de una especie en el espacio ambiental y proyectarlo en el espacio geográfico (43, 51 y 77).

2.1.5. Antecedentes para Ecuador

Actualmente, en Ecuador existe la presencia de FOC RT1, la cual es un tipo de raza de *Fusarium* que en los años 60 causó fusariosis en tres variedades del banano: Gros Michel, Manzano y Pisang Awak (44). Además, en el país también se ha reportado la presencia de la raza FOC RT2, y a pesar de que aún no se ha reportado la presencia de la variante FOC RT4; se supone que el ingreso de esta raza al país provocaría severos impactos económicos y sociales. Ante lo expuesto, cabe indicar que, según Autoridad Nacional de Protección Fitosanitaria, en el Ecuador se están empleando las medidas necesarias para prevenir el ingreso de esta nueva variante al país y sus regiones (45) (46).

En otras investigaciones realizadas en el país, fue demostrado que, la introducción de la Fusariosis del banano en el Ecuador, se dio por primera vez en la provincia Guayas durante el año 1936 (47). Desde ese entonces, se asume que la enfermedad se fue distribuyendo mediante el suelo y materiales contaminados hacia otras regiones del país. Consecuentemente, una investigación realizada por la ESPOL, sobre las poblaciones de Foc en el país, determinó que en Ecuador estas poblaciones son de un único linaje clonal y que están asociados al Grupo de Compatibilidad Vegetativa (GCV) 0120, caracterizado como raza 1. Aunque se destaca el hecho de que, alrededor del mundo se han identificado 24 GCV de Foc, siendo el GCV01213 el que se encuentra asociado a la raza 4 tropical, una de las más severas para las plantaciones (47) (48).

En varios estudios desarrollados sobre la reacción de *F. oxysporum* en una colección de Lasiocarpa del INIAP, se logró demostrar que, todas las secciones de *Solanum quitoense* fueron vulnerables al patógeno de *Fusarium*; mientras que, las secciones de *Solanum pectinatum*, *Solanum stramonifolium*, *Solanum hirtum*, *Solanum pseudolulo*, *Solanum tequilense* y el híbrido desarrollado por el INIAP (Palora) presentaron resistencia ante el patógeno (49). Finalmente, el estudio concluyó que el *S. quitoense* mostró síntomas

retrasados y la colonización de *F. oxysporum* fue de menor magnitud en comparación a las demás accesiones estudiadas. Por otro lado, el híbrido de la INIAP-Palora, fue altamente resistente al patógeno, sin presentar ninguna sintomatología o modificación (49) (45).

En consecuencia, con la llegada del FocR4T a Latinoamérica, los países productores de banano y otras especies a las que ataca esta enfermedad, deben unir esfuerzos para el diseño e implementación de programas de contingencia para erradicar la enfermedad. En el caso de Ecuador, además de los esfuerzos y programas que existen actualmente, se debe tener en consideración que, para enfrentarse a un patógeno de tal peligro y magnitud, la sostenibilidad es un componente esencial que debe ser considerado para todos los proyectos de mitigación y erradicación que se lleven a cabo en cuanto al combate de esta enfermedad (45).

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Localización

La investigación se realizó en la parte continental del Ecuador (Fig. 2), que se encuentra dividido en tres regiones: Costa, Sierra y Oriente. Limita al norte con Colombia, al sur y este con Perú y al oeste con el Océano Pacífico. Además, influye la Cordillera de Los Andes en su variación climática (cálido y húmedo).

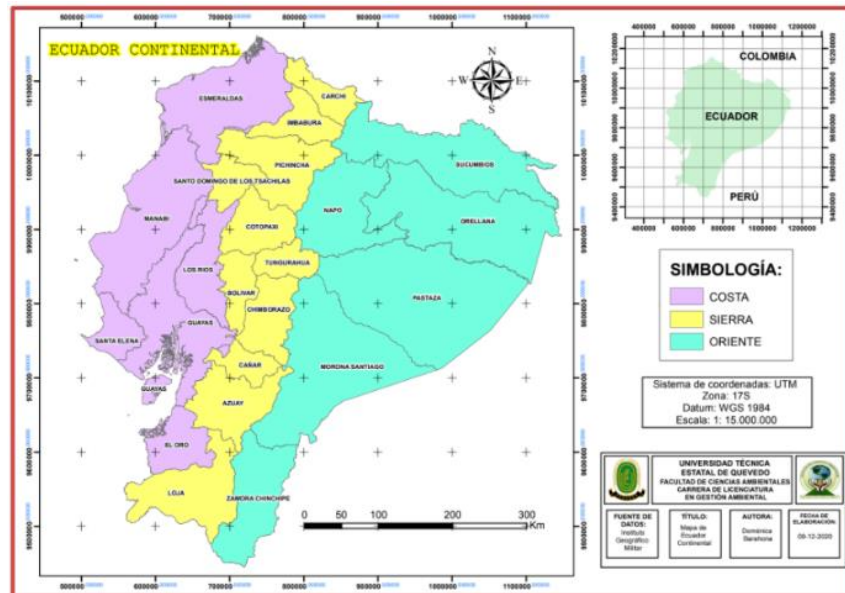


Figura 2. Mapa de Ecuador continental.

Fuente: Instituto Geográfico Militar

3.2. Tipo de investigación

3.2.1. Exploratoria

Para desarrollar el modelo de los nichos ecológicos, sus mapas de distribución geográfica y las áreas de riesgo potencial, tomando en cuenta los escenarios del cambio climático presente y futuro; fue necesario la utilización de la investigación exploratoria, ya que son deficientes los datos que existen en cuanto a esta problemática; además, con su uso se logró obtener la información pertinente para profundizar en el tema y poder brindarle una solución. Cabe indicar que, la evaluación fue realizada por medio de los escenarios RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5 para los años 2050, 2070.

3.2.2. Experimental

En este caso, la investigación experimental se usó para la modelación de los nichos ecológicos y la elaboración de los mapas de distribución geográfica; además, permitió reflejar la dependencia de las variables bioclimáticas seleccionadas para el presente estudio, considerando dentro de este proyecto 19 variables bioclimáticas actuales y para el futuro (para RCP 6.1, RCP 4.5 Y RCP 8.5). La importancia de la permutación ecológica de cada nicho se obtuvo en porcentaje, estos reflejaron la dependencia de la idoneidad pronosticada tanto para la variable seleccionada como para las dependencias inducidas por las correlaciones entre ellos, a fin de predecir las condiciones favorables de la disponibilidad climática.

3.2.3. Descriptiva

Respecto a la investigación descriptiva, se utilizó para describir los cambios en la distribución potencial del patógeno y su rango de expansión. También permitió describir la dinámica de expansión en la zona continental del país, distribuido de acuerdo con la equivalencia del nicho ecológico que corresponde a la categorización de no ocupación, expansión del rango, sin cambios y contracción del rango. Se ejecutó un mapa distributivo con el área correspondiente a la equivalencia antes mencionada, logrando conocer las áreas donde una especie futura (años 2050, 2070) puede expandirse.

3.3. Métodos de investigación

- **Método descriptivo**

Este método se utilizó para obtener información general sobre la expansión de *F. oxysporum* F. sp. *cubense*, como lo son mapas de distribución potencial hacia lugares en los años 2050 y 2070, por medio de diferentes escenarios (RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5) proyectados en Ecuador continental, describiendo los sitios y su relación con las variables bioclimáticas actuales y futuras.

- **Método deductivo**

Por medio de este método, se pudo utilizar los registros existentes sobre la especie en diferentes lugares a nivel mundial, con sus respectivas variables climáticas en escenarios de RCP. Anexando que todo esto permitió conocer la distribución geográfica en condiciones óptimas para la elaboración de los mapas sobre la presencia de los constantes cambios de climáticos actuales y futuros.

- **Método Comparativo**

En cuanto a este método, fue usado para comparar la información proporcionada por los mapas sobre los cambios en el área de distribución potencial del patógeno en Ecuador continental, permitiendo también la categorización de las áreas con mayor potencial de expansión de *Fusarium*, en el actual con el futuro para sus respectivos escenarios RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5, alcanzando cambios en su distribución geográfica.

3.4. Fuente de recopilación de información

3.4.1. Fuentes primarias

Se utilizaron los registros de presencia extraídos con la herramienta Nichetoolbox (<http://shiny.conabio.gob.mx:3838/nichetoolb2/>) con el propósito de agilizar el proceso de descarga desde ubicaciones georreferenciadas. Además, esta base de datos permite extraer información de Global Biodiversity Information Facility (GBIF) con la finalidad de verificar los registros que existen del patógeno *F. oxysporum* F.sp. *cubense* a nivel mundial y nacional.

Por otro lado, se utilizó Worldclim que contiene datos climatológicos a nivel mundial, siendo una herramienta eficaz a la hora de emplear variables ambientales cartográficas en cambio climático; desde esta base, se descargaron los datos de las variables bioclimáticas futuras, para el año 2050 y 2070, en escenarios de RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5.

3.4.2. Fuentes secundarias

La selección de información bibliográfica fue basada en consultar, analizar e indagar cada fuente que propicie certeras referencias del tema, tales como:

- Casos de estudio
- Literatura científica
- Artículos de revista científica
- Tesis de grado

3.5. Diseño de la investigación

- **Modelar el nicho climático de *Fusarium oxysporum* F. sp. *cubense* en Ecuador continental**

Para establecer la base de datos de la especie, se revisaron varias fuentes de información científica confiables que ayudaron a obtener los registros de presencia (coordenadas geográficas) (50), las cuales fueron: Literatura científica (artículos, (51) (61) y NicheToolbox (52). Luego de conformar la base de datos que se obtuvieron de las fuentes mencionadas, se utilizó la herramienta NicheToolbox para hacer una depuración de los mismos, con la finalidad de eliminar registros duplicados y erróneos que no aporten al modelo.

Para la modelación del nicho se usaron los registros de presencia de la especie y las 19 variables bioclimáticas disponibles en el WorldClim 1.4, con una resolución de 30 arc-segundos ($\sim 1 \text{ km}^2$) (34) (Tabla 1). De los cuales se trabajó con 15 variables, para luego ser analizadas y seleccionadas según su influencia sobre *Fusarium oxysporum*. Para la selección de las variables se usaron los métodos siguientes: (1) revisión de la ecología de *Fusarium*; (2) revisión de literatura sobre modelación de la distribución de *Fusarium*; (3) correlación entre variables; (4) análisis de componentes principales y (5) modelo con Maxent (Tabla 2).

Tabla 2. Variables más importantes según su influencia sobre *Fusarium oxysporum* F. sp. *cubense* identificadas a través de cinco métodos.

ECOLOGÍA DE <i>FUSARIUM</i>	LITERATURA DE MODELOS DE LA ESPECIE	CORRELACIÓN ENTRE VARIABLE	ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES	MODELO CON MAXENT
Bio1	Bio1	Bio1	Bio1	Bio1
Bio3	Bio2	Bio2	Bio3	Bio5
Bio5	Bio12	Bio3	Bio5	Bio12
Bio7	Bio13	Bio4	Bio6	Bio13
	Bio16	Bio5	Bio13	
		Bio6		
		Bio12		
		Bio14		
		Bio15		
		Bio19		

Fuente: Autora.

Se creó la tabla 2 de métodos de variables para así poder hacer un análisis y escoger las variables con mayor predicción para la especie. Las variables que más se relacionaban con el patógeno fueron: bio1, bio5, bio12, bio13. WorldClim tiene una cobertura temporal de 1961-1990 para el presente. La información climática se extrajo de cada punto de presencia de la especie con el uso del sistema de información geográfica (SIG) ArcGIS 10.4.1 (53).

El algoritmo de máxima entropía Maxent 3.4.0 (54), se utilizó para el modelo de nicho para esta especie. Para este proceso, solo se necesitan datos sobre la existencia de especies y variables climáticas, obteniendo un modelo de escenario ambiental favorable para esa especie.

- **Caracterizar la distribución geográfica potencial de *Fusarium oxysporum* F. sp. *cubense* en Ecuador continental en el presente y ante escenarios de cambio climático**

Para conocer el potencial invasivo actual y futuro de *F. oxysporum* F. sp. *cubense* en Ecuador continental, el modelo se proyectó a un escenario climático actual para el país (1961- 1990) y a escenarios climáticos futuros, uno cercano con su centro en 2050 (2041- 2060) y otro lejano centrado en 2070 (2061-2080), bajo tres escenarios de concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, uno de mitigación (RCP 2.6), uno cauteloso (RCP 4.5) y otro extremo (RCP 8.5). Cada RCP (*Representative Concentration Pathways*, por sus siglas en inglés) contiene una serie de suposiciones socioeconómicas, tecnológicas y biofísicas diferentes (55).

Este modelo fue proyectado al espacio geográfico para generar un mapa que representa la distribución de las condiciones favorables para la especie, o su distribución potencial (56). El modelo de nicho también se proyectó en escenarios de cambio climático (57). Las proyecciones geográficas de estos modelos se pueden utilizar como insumos en la búsqueda de estrategias para monitorear el riesgo de invasión en condiciones ambientales actuales y futuras (58).

En la calibración de los modelos se usaron registros de presencia adquiridos de bases de datos internacionales donde se encontró registros en línea de la especie (Figura 3). Para calibrar el modelo de la especie se empleó el 80% de los datos de presencia y el otro 20% para validarlo internamente. La función de *jackknife* que realiza Maxent a los datos de calibración, permitió obtener valores que se compararon para determinar la significación de las variables climáticas en el modelo, en el momento de correr el modelo con variables individuales. La prueba ROC parcial se usó para validar y evaluar el modelo resultante y se interpreta como área que ante la probabilidad de un par de puntos, uno con presencia y otro sin presencia (del patógeno), por consiguiente, para que la prueba se califique correctamente, el rendimiento del modelo con el área bajo la curva (AUC), se interpretaron valores 1 (prueba perfecta) y 0,5 (prueba invalida).

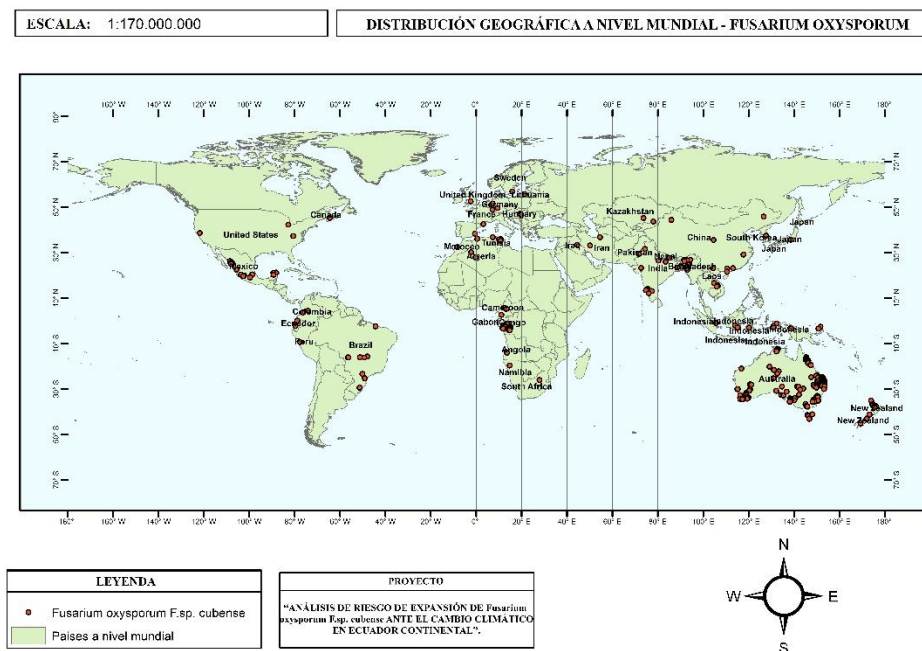


Figura 3. Registros de presencia de *Fusarium oxysporum* F.sp. *cubense* obtenidos para la modelación a nivel mundial.

Fuente: Autora.

- **Identificar las ganancias, pérdidas o la estabilidad en la distribución geográfica potencial del patógeno entre el presente y los escenarios de cambio climático**

Se transformaron los mapas continuos de adecuación a mapas binarios de presencia-ausencia, utilizando como umbral de corte el *10mo percentil* de los datos de calibración. Con los mapas binarios se realizaron comparaciones entre la distribución actual y futura para identificar expansiones, estabilidad o contracción en la distribución geográfica potencial de la especie, usando la herramienta SDMTToolBox (SDM Tools- Maxent Tools- Distribution Changes Between Binary) en ArcGis. A partir de este análisis se obtuvo la extensión del área en km² para cada escenario y se visualizó el rango de expansión, contracción o si la especie no presenta cambios hacia el futuro.

3.6. Instrumentos de investigación

- Se utilizó NicheToolBox para terminar de verificar detalladamente el resumen de los valores estadísticos por medio de las curvas ROC PARCIAL a una tasa de omisión de 0.05, un porcentaje de puntos aleatorios de 50%, para obtener el valor de ROC PARCIAL que indica cuanto predice o cuan valido es este modelo para predecir las áreas con condiciones adecuadas.
- Se utilizó ArcGis 10.4.1., para visualizar, analizar y crear datos de formato requerido para cambios geográficos potenciales. Se procrearon las capas bioclimáticas actuales, respecto a su distribución global y se empleó el mismo proceso para obtener capas bioclimáticas requeridas para la proyección actual y futura en Ecuador.
- La herramienta Maxent se utilizó para el modelo de nicho ecológico de la especie. Para este proceso solo se requirieron datos sobre la existencia de la especie y sobre las variables climáticas con el fin de obtener un modelo de escenarios ambientales favorables para la especie. Este modelo se proyectó en el espacio geográfico para crear un mapa que muestre la distribución de las condiciones favorables para la especie, o su distribución potencial.

3.7. Tratamiento de los datos

Los datos obtenidos fueron analizados por medio de los siguientes programas; XLSTAT se utilizó para realizar el análisis de datos en Excel, permitiendo personalizar, analizar los resultados para luego ser compartidos, NicheToolBook se usó para adquirir los datos de registro donde hay presencia del hongo a nivel mundial, luego poder facilitar el análisis de los datos y para poder prestar más atención a los resultados para su debida interpretación el algoritmo de máxima entropía Maxent (área bajo la curva AUC) que se presenta desde 0 siendo un hábitat inadecuado, seguido del 1 que es hábitat óptimo, Además, cuando el valor de distribución es > 0.5 hace saber que las condiciones son favorables ante la presencia de *Fusarium oxysporum*, valores contrarios < 0.5 , significa que las condiciones de hábitats son inadecuadas (59). A través del software

Maxent, se hizo uso de las localidades de presencia de la especie, como también de las variables bioclimáticas se modelaron el nicho climático para la especie.

El método por el cual se basa Maxent, es la máxima entropía que se utilizó para crear modelos de distribución de especies (SDM). Además, al culminar el proceso de Maxent en cada pixel asigna una probabilidad negativa en el área de estudio, deberán al final sumar 1, y cada pixel presenta valores muy pequeños, indicando la probabilidad de ocurrencia del patógeno (33).

En ArcGIS, se desarrollaron los mapas binarios con el recorte de las tres regiones y así poder analizar el área con mayor extensión de presencia para el presente y futuro en forma general y los mapas probabilísticos se desarrollaron para medir la probabilidad de presencia potencial de la especie.

El software con el que se trabaja se cargó con capas bioclimáticas en formato Ascii y variables, además con datos de presencia de la especie, esto es que las coordenadas que fueron guardadas en decimales, en formato CSV, se encuentra disponible en Excel.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

4.1.1. Modelar el nicho climático de *Fusarium oxysporum* F. sp. *cubense* en Ecuador continental

Fusarium oxysporum F. sp. *cubense*

Para la evaluación del rendimiento del modelo del nicho climático, se realizó con diferentes algoritmos, con Maxent se evidenció que el modelo tuvo un alto rendimiento para los datos de entrenamiento o de calibración con un valor de AUC=0.837, siendo el valor superior 0.5., para los datos de validación con un valor de AUC=0.783. Para el área bajo la curva ROC parcial se obtuvo un valor promedio de 1.24. Por lo tanto, dichos valores indican que el modelo tuvo un buen rendimiento según las variables utilizadas, además, se comprueba que el modelo obtenido predice adecuadamente, ya que dentro de la predicción de modelo un valor mayor a 0.5 significa que el modelo predice y si es igual a 0.5 o por debajo de 0.5 significa que es un modelo realizado aleatoriamente, el modelo no predice.

➤ **Estimaciones de las contribuciones relativas al modelo de nicho ecológico de las variables ambientales**

Mediante el análisis de contribuciones de las variables, se proporcionaron las estimaciones relativas de las variables ambientales para el modelo (Tabla 3). Siendo así, los resultados de porcentaje de aporte de las variables de temperatura media anual (°C) tuvo el mayor aporte (43.6%) y mayor importancia en el análisis de permutación (34.7). La precipitación anual (mm) también tuvo un aporte elevado (27.5%) y temperatura máxima media del periodo más cálido (°C) (22.6%) (Tabla 3). La variable de menor aporte o relación con el modelo fue la de precipitación del periodo más lluvioso.

Tabla 3. Análisis de contribución de las variables climáticas al modelo de nicho climático de *Fusarium oxysporum* F. sp. *cubense* en Ecuador continental.

Variables	Contribución Porcentual	Importancia de la permutación
Temperatura promedio anual (°C) (bio_1)	43.6	34.7
Precipitación anual (mm) (bio_12)	27.5	25.3
Temperatura máxima media del periodo más cálido (°C) (bio_5)	22.6	26.5
Precipitación del periodo más lluvioso (bio_13)	6.3	13.6

Fuente: Autora.

Según el comportamiento de la probabilidad de encontrar condiciones adecuadas para la presencia de *F. oxysporum* F. sp. *cubense* en función de la variación de la temperatura media del periodo más cálido, entre los mayores valores se identificaron en el intervalo de 2.5°C a 24°C. Por encima de los 25°C la probabilidad disminuye (Figura 5).

Según la variación de la temperatura promedio anual (Bio_1), que fue la de mayor aporte al modelo, la probabilidad de encontrar condiciones adecuadas aumenta en la medida aumenta entre 5 y 25 °C la temperatura media anual (Figura 5). Por debajo o por encima de estos valores de temperatura respectivamente, la probabilidad disminuye.

Según la variación de la precipitación anual Bio_12, se puede visualizar que la probabilidad de presencia predicha alcanza su valor máximo a los 1500. A partir de ello, por encima o por debajo de este valor la probabilidad es menor.

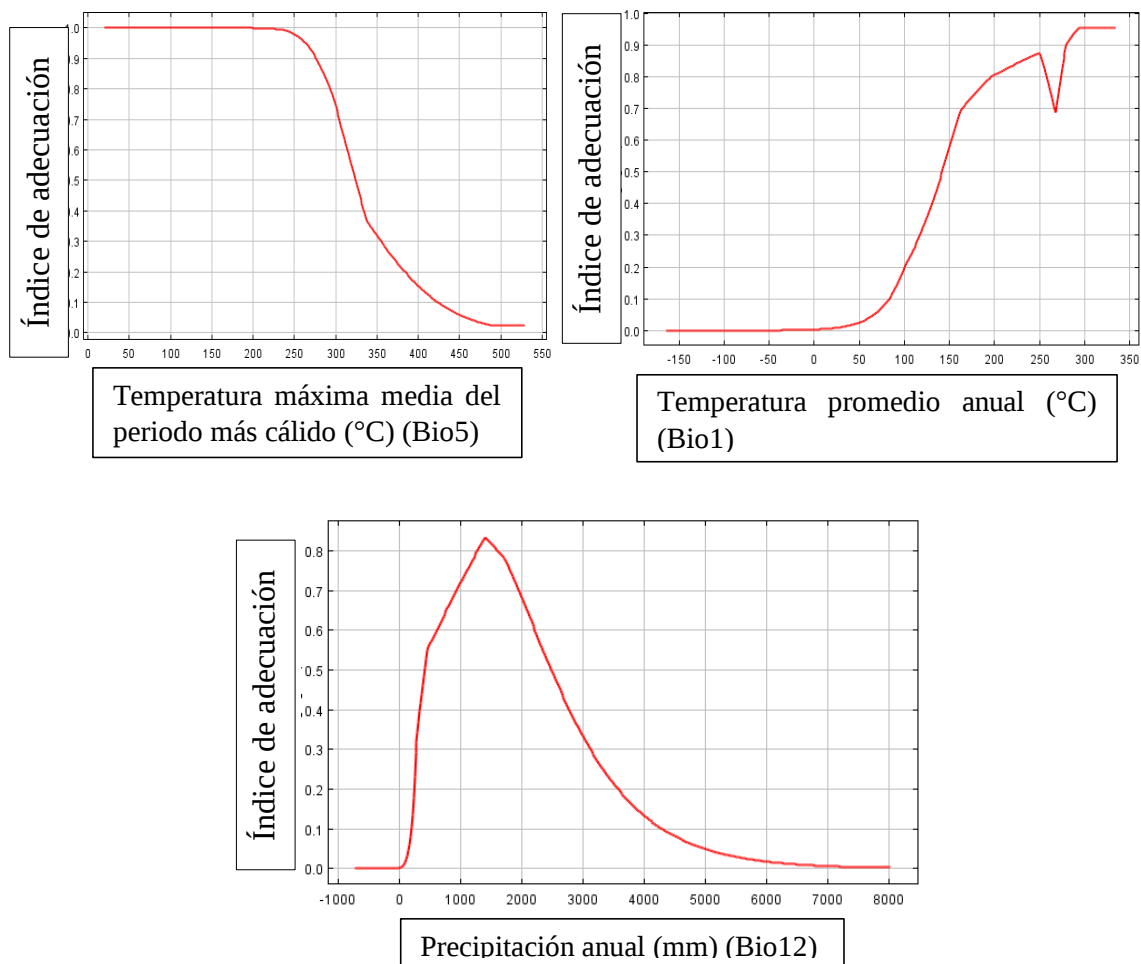


Figura 4. Comportamiento de la probabilidad de encontrar condiciones adecuadas para *Fusarium oxysporum* F sp. *cubense* en Ecuador continental según las variaciones de la temperatura máxima media del periodo más cálido (°C), temperatura promedio anual (°C), precipitación anual (mm). Los valores de temperatura están multiplicados por 10.

Según la representación del nicho conocido de *F. oxysporum* en el espacio ambiental (Figura 5), se identificó una alta tolerancia de la especie a un amplio rango de temperatura. La dispersión de los datos es alta, fundamentalmente en función de la temperatura media anual. Existen varios registros que aparecen fuera del nicho fundamental de la especie, lo que puede estar relacionado con registros incorrectos o incluso pueden dar un indicio de ampliación en el rango de condiciones climáticas en las que puede aparecer la especie.

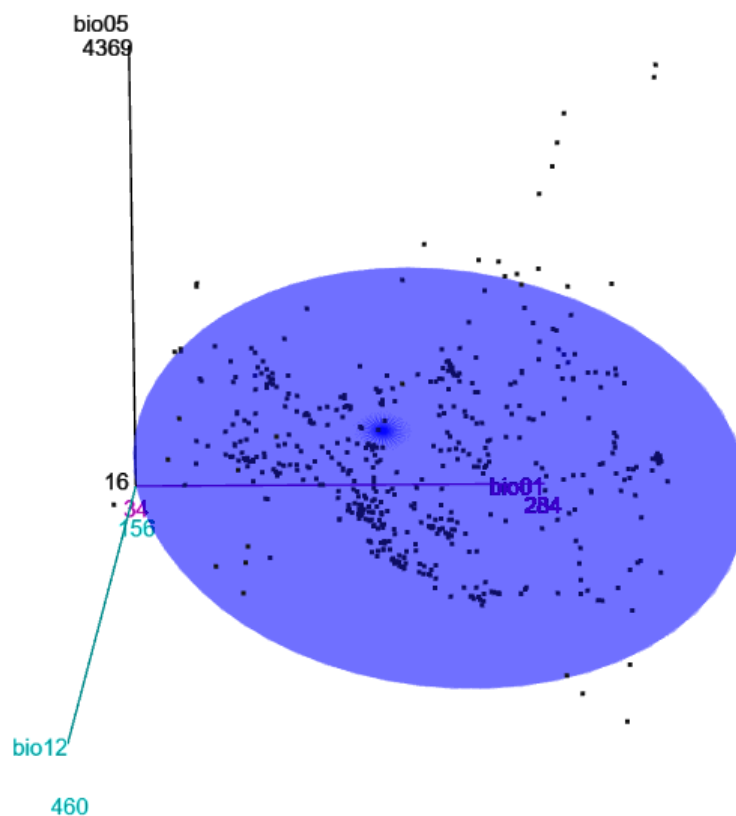


Figura 5. Nicho conocido de *Fusarium oxysporum* representado en el espacio ambiental con las variables climáticas de mayor aporte al modelo de nicho ecológico generado con Maxent.

4.1.2. Caracterizar la distribución geográfica potencial de *Fusarium oxysporum* F. sp. *cubense* en Ecuador continental en el presente y ante escenarios de cambio climático

4.1.2.1. Probabilidad de presencia potencial de *F. oxysporum* F. sp. *cubense*

De acuerdo a los resultados del modelo del nicho (Figura 6), para el escenario actual, son altas las probabilidades de presencia potencial de la especie, en el Norte de la región Sierra ecuatoriana y al Este de la región Costa, para la región Amazónica existe media probabilidad de presencia potencial de *F. oxysporum* F. sp. *cubense*.

Por otra parte, para los escenarios futuros, año 2050, 2070, los escenarios RCP 2.6 y RCP 4.5, se mantienen altas las probabilidades de presencia potencial de la especie (Figura 6), en la Norte de la región Sierra, al Este y Oeste para la región Costa y muy bajas las probabilidades para la región Amazónica zona Norte y Sur.

Para el año 2050, 2070, en el escenario RCP 8.5, (Figura 6) se encuentra una alta probabilidad de presencia potencial en la región Sierra, habiendo un cambio en la región Amazónica zona Oeste, donde existiría media probabilidad de presencia potencial. Puesto que, en estas regiones la temperatura es húmeda.

4.1.2.2. Distribución potencial de *F. oxysporum* F. sp. *cubense*

Según los resultados para la modelación en Ecuador continental (Tabla 4), para el presente estudio se obtuvo un área actual de 220321 km², con las condiciones climáticas favorables para la presencia potencial de *F. oxysporum* F. sp. *cubense* (Figura 7). Esta zona incluye la región Costa, Sierra y Amazonía, con mayor índice de adecuación en la Costa y la Sierra. La región que obtuvo menor índice de adecuación fue la Amazonía y un porcentaje muy mínimo de la Sierra (Figura 6).

Para escenarios climáticos futuros, uno cercano con su centro en 2050 (2041-2060) (Figura 6) bajo un escenario de mitigación (RCP 2.6) se encontró un área de 189278 km² con condiciones climáticas favorables para la presencia potencial de la especie. La región Costa tuvo mayor extensión de presencia del patógeno con 23.104 Km², seguido de la región Sierra con 22.351 Km². Para el escenario cauteloso (RCP 4.5) la extensión fue menor 181543 Km², con condiciones climáticas favorables para la presencia potencial de la especie, encontrándose en la región Costa con mayor extensión de presencia del patógeno (68.222 Km²), seguido de la región Sierra con 68.040 Km². Por último, para un escenario extremo (RCP 8.5) se encontró un área de 182498 Km², con condiciones climáticas favorables para la presencia potencial de *Fusarium* en la Sierra ecuatoriana con 56.835 Km², seguido de la Costa ecuatoriana con 56.834 Km². Para los tres escenarios existen condiciones climáticas favorables para la presencia de la especie en dos regiones del Ecuador continental: Costa y Sierra, que se caracterizan por climas tropicales, calientes. En la Amazonía se identificó escasa distribución.

Para el año 2070 (2061-2080), bajo tres escenarios climáticos; un escenario de mitigación (RCP 2.6), el área encontrada fue de 188575 Km² con condiciones climáticas favorables para la presencia potencial de *Fusarium oxysporum* F. sp. *cubense* (Figura 7). Se identificó a la región Costa ecuatoriana con la mayor extensión de presencia del patógeno

con 74.004 km², seguido de la región Sierra con 67.549 km². Bajo este escenario, la expansión se mantiene en la región Costa y Sierra. Para un escenario cauteloso (RCP 4.5), se encontró un área de 171707 Km² con condiciones climáticas favorables para la presencia potencial de *Fusarium oxysporum* F. sp. *cubense* (nicho potencial; figura 7). En la región Sierra con 66.391 km² manteniendo mayor presencia del patógeno, en la región Costa ecuatoriana con 64.804 km² comenzaría a existir un poco de ausencia y por último se encuentra la Amazonia con mayor ausencia de la especie.

Para el escenario extremo (RCP 8.5) se encontró un área de 201752 Km² con condiciones climáticas favorables para la presencia potencial de *F. oxysporum* F. sp. *cubense* (nicho potencial; figura 7). En la región Amazónica se identificó la mayor extensión de distribución del patógeno con 68.330 Km², seguido de la región Sierra con 68.032 Km². Bajo este escenario, la posible expansión del hongo se mantendría en la Amazonía y Sierra del país, caracterizándose por climas tropicales muy húmedos. En este escenario extremo, aumentaría la distribución potencial del patógeno en comparación con el escenario actual y futuro para el 2050, principalmente la región Amazónica, lo cual se podría dar por los descensos en las precipitaciones que se esperan para ese periodo.

Tabla 4 . Extensión (km²) de la distribución geográfica de *Fusarium oxysporum* F. sp. *cubense* en las diferentes regiones de Ecuador continental para el presente y en escenarios de cambio climático. Entre paréntesis se incluye el porcentaje que representa la extensión respecto a la distribución total para el escenario correspondiente.

Región	Presente Total 220321 km ²	2050			2070		
		RCP 2.6 Total 189278 km ²	RCP 4.5 Total 181543 km ²	RCP 8.5 Total 182498 km ²	RCP 2.6 Total 188575 km ²	RCP 4.5 Total 171707 km ²	RCP 8.5 Total 201752 km ²
Costa	78.631 (36%)	23.104 (12%)	68.222 (38%)	56.834 (31%)	74.004 (39%)	64.804 (38%)	63.034 (31%)
Sierra	64.444 (29%)	22.351 (12%)	68.040 (37%)	58.562 (32%)	67.549 (36%)	66.391 (39%)	68.032 (34%)
Amazonía	68.961 (31%)	16.035 (8%)	43.082 (24 %)	39.562 (22%)	44.824 (24%)	36.521 (21%)	68.330 (34%)

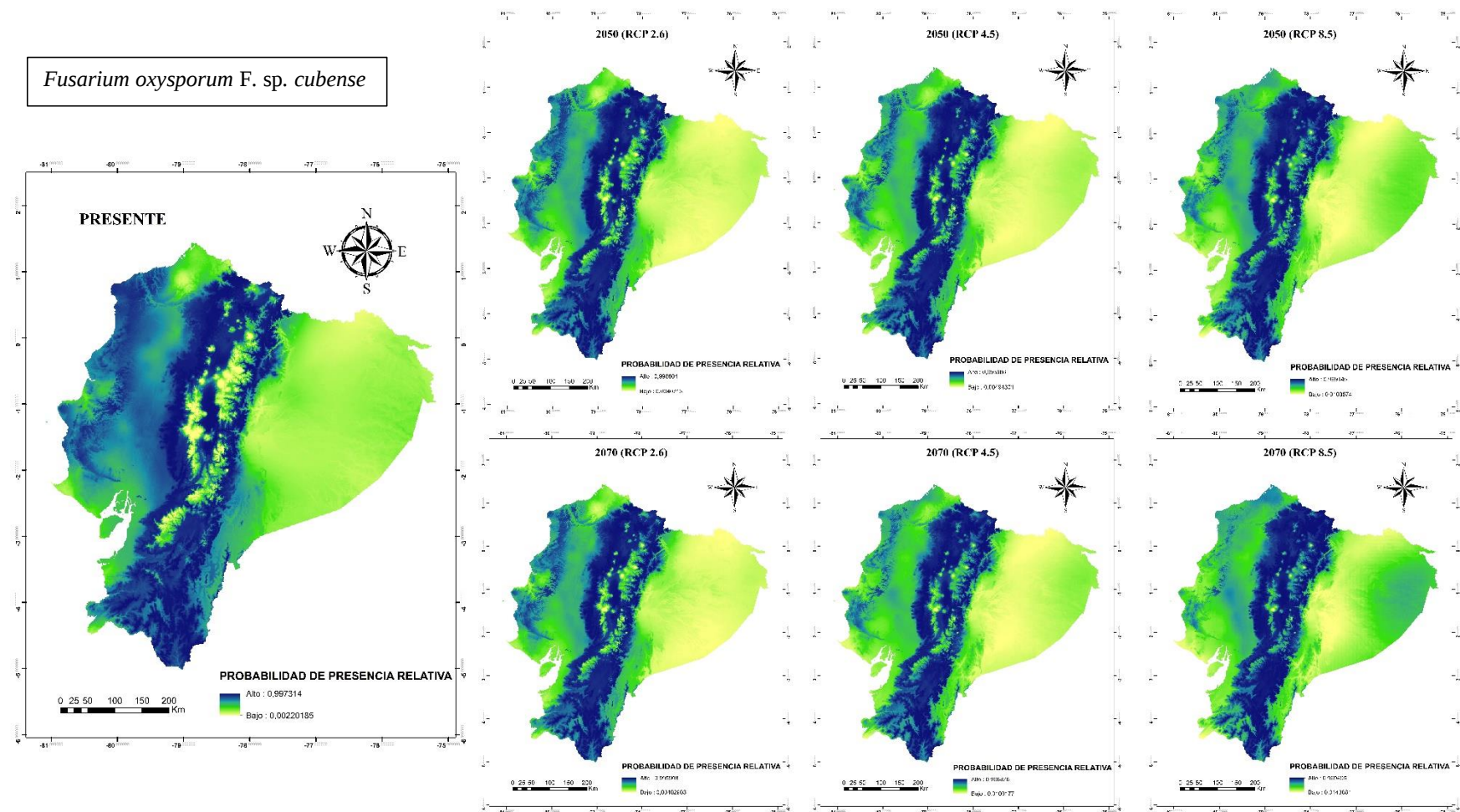


Figura 6. Mapas de probabilidad de distribución para el presente y futuro de *Fusarium oxysporum* F. sp. *cupense* en Ecuador continental para los años 2050, 2070 en escenario de mitigación (RCP 2.6), escenario moderado (RCP 4.5) y otro extremo (RCP 8.5).

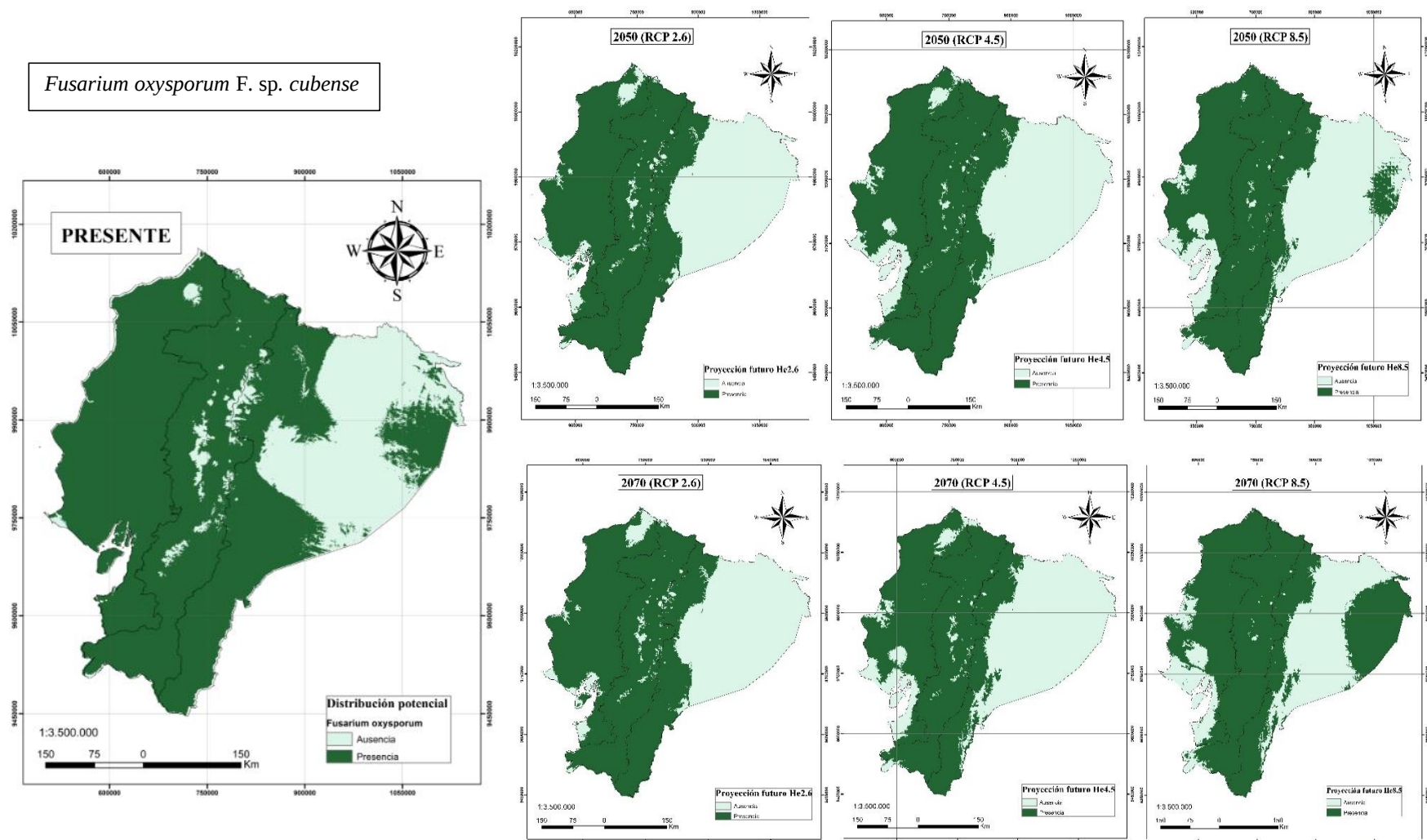


Figura 7. Mapas de Distribución potencial para el presente y futuro de *Fusarium oxysporum* F. sp. *cubense* en Ecuador continental para los años 2050, 2070 en escenario de mitigación (RCP 2.6), escenario moderado (RCP 4.5) y otro extremo (RCP 8.5).

4.1.3. Identificar las ganancias, pérdidas o la estabilidad en la distribución geográfica potencial del patógeno entre el presente y los escenarios de cambio climático

Para el tercer objetivo se compararon las distribuciones en los seis escenarios contra el presente, determinando que la extensión del área geográfica potencial de la especie tuvo cambios muy pequeños hacia el futuro. De forma general, la expansión fue menor en el área de distribución geográfica del escenario moderado (RCP_4.5) y para el escenario de mitigación (RCP_2.6) y el extremo (RCP 8.5) el área de expansión fue mayor (Tabla 5; Figura 8).

En el año 2050, bajo un escenario de mitigación (RCP 2.6), el patógeno tuvo un rango de expansión de 3798.51 km^2 y la contracción fue de 1640.05 km^2 . Para el escenario moderado (RCP 4.5), el patógeno se podría expandir más en relación al RCP 2.6 (4761.08 km^2) y contraerse más también (17934.88 km^2). En el escenario extremo (RCP 8.5), la expansión identificada fue de 12496.51 km^2 , menor que los RCP anteriores y la contracción fue superior a las anteriores (24795.45 km^2) (Tabla 5; Figura 8).

Para los escenarios del 2070, la expansión en el RCP 2.6 fue menor que en el RCP 4.5 (Tabla 5; Figura 8) y la contracción fue de 11220.13 km^2 , la menor en relación a estos tres RCP. El escenario moderado (RCP 4.5) tuvo la mayor expansión (4777.98 km^2), y el escenario extremo (RCP 8.5) tuvo la mayor contracción en la distribución (29865.06 km^2) (Tabla 5; Figura 8).

Tabla 5. Variaciones en la extensión (km²) de la distribución geográfica potencial de *Fusarium oxysporum* F. sp. *cubense* en diferentes escenarios de cambio climático.

DESCRIPCIÓN	ESCALA	2050			2070		
		RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
Rango de expansión	-1	3798.51	4761.08	12496.51	3839.71	4777.98	33997.46
Sin ocupación	0	75606.73	74644.16	66908.73	75565.53	74627.26	45407.78
Sin cambios	1	157032.2 2	149737.3 9	142876.8 3	156452.1 4	141361.6 5	137807.2 1
Rango de contracción	2	1640.05	17934.88	24795.45	11220.13	26310.62	29865.06

Fusarium oxysporum F. sp. *cubense*.

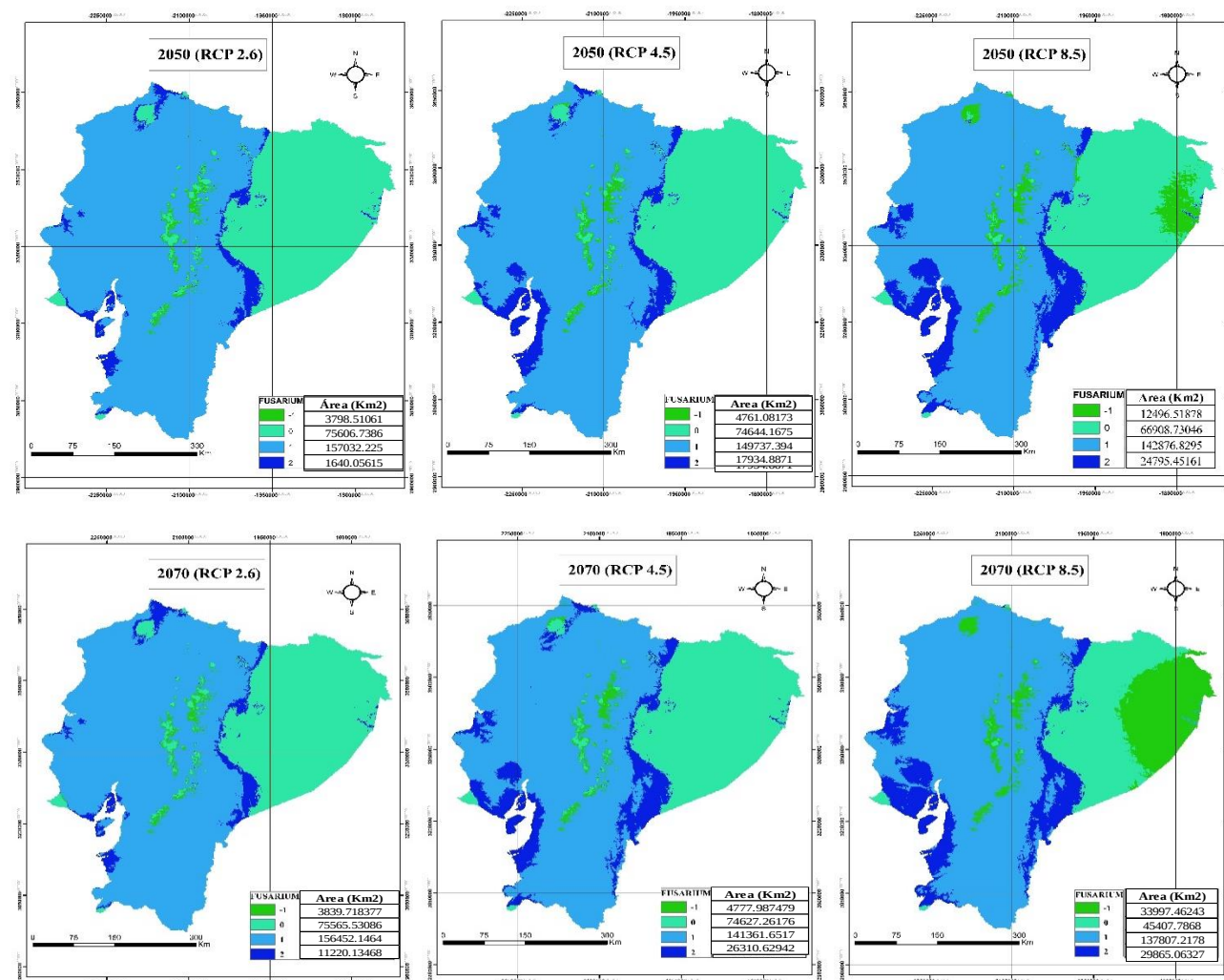


Figura 8. Regiones de expansión y contracción de la distribución geográfica potencial de *Fusarium oxysporum* F. sp. *cubense* en el y futuro (2050 y 2070), bajo escenarios de mitigación (RCP 2.6), moderado (RCP 4.5) y extremo (RCP 8.5).

4.2. Discusión

La incidencia del cambio climático en los cultivos que se han visto afectados por *Fusarium oxysporum*, debe ser estudiada y comprendida para poder pronosticar las modificaciones que se presentan en los sistemas agrícolas y su entorno. El estudio de estas modificaciones se considera fundamental, ya que, las variaciones de tiempo y espacio que demanda el clima, permiten generar respuestas de resistencia en los hongos que habitan el suelo (38) (39). Lo antes expuesto se evidencia en la presente investigación, puesto que, se pudo determinar que las condiciones climáticas estudiadas fueron favorables para la distribución potencial de *Fusarium oxysporum* F. sp. *cubense*, lo que quiere decir que, las variaciones y condiciones del clima en cualquier región pueden incidir directamente en la presencia y distribución de patógenos, sobre todo en la resistencia de estos para habitar el suelo. Cabe señalar que, para este estudio las zonas con condiciones climáticas con mayor potencial para la presencia de *Fusarium* fueron la Costa y la Sierra.

Se estimaron los efectos del cambio climático sobre la marchitez por *Fusarium* utilizando anomalías de temperatura mediante la dispersión de *F. oxysporum* F. sp. *Cubense* para los años 2030, 2060. En esta investigación, se estima que durante los eventos de lluvia extremos que den lugar a inundaciones, la enfermedad es rápidamente distribuida entre plantas, campos enfermos, sanos. Por medio de la ley de acción de la temperatura sobre el crecimiento del territorio, se determina que el patógeno se desarrolla óptimamente en un rango de temperaturas de 23 a 29 °C (60). Por otro lado, para poder obtener los resultados de esta investigación, se estudiaron 3 escenarios climáticos futuros; en el escenario de mitigación se consideran condiciones climáticas favorables para la presencia potencial del patógeno, tanto en región Costa como en región Sierra; mientras que, para el escenario cauteloso se determinaron menores condiciones climáticas para ser favorables ante la presencia potencial de la especie; no obstante, para el escenario extremo se evidenció que las condiciones climáticas son mucho más favorables para la presencia potencial de *Fusarium* tanto en la Sierra como en la Costa. Finalmente, se puede llegar a la conclusión que, aunque en diferentes proporciones, todos los escenarios son favorables en sus condiciones climáticas para la presencia futura de *Fusarium*.

El patógeno *F. oxysporum* es la enfermedad más distribuida geográficamente y severa que ha sido diagnosticado en la mayoría de países cultivadores, siendo una de las principales factores limitantes del cultivo, pudiendo llegar a devastar el cultivo por completo en condiciones favorables para el desarrollo de la enfermedad (61). Para esto se debe llevar un control y prevención del patógeno para mejorar la productividad y el manejo adecuado durante el presente y futuro.

Tal es el caso del actual estudio, donde se evidencia que el escenario climático para el presente y futuro, tuvo proyecciones favorables para la presencia potencial del patógeno en sus 3 escenarios climáticos; es así que, para el escenario de mitigación (RCP 2.6) las condiciones climáticas fueron favorables para la presencia potencial de *Fusarium*, siendo la región Costa la que presentó mayor extensión de presencia del patógeno, teniendo una temperatura entre los 24 a 25°C o hasta 22°C en zonas cordilleras, los niveles de precipitación anual varían de menos a 60 mm a más de 2000 mm. Seguida por la región Sierra con temperaturas promedio entre 8 a 20°C, sus precipitaciones varían entre 800 y 1500 mm (62). Para el escenario cauteloso (RCP 4.5) también se evidenciaron condiciones climáticas favorables para la presencia potencial de *Fusarium oxysporum* F. sp. *Cubense*, en este caso la región Sierra presentó una mayor presencia del patógeno seguida de la región Costa. Por último, en el escenario extremo (RCP 8.5) se determinó que, la región Amazónica es la que presenta mayor extensión de presencia del patógeno, debido a que sus precipitaciones en esta región son constantes >4500 mm, su temperatura promedio es de 24 a 25°C, con máximo hasta seguida de la región Sierra.

Dado que hasta la actualidad no existe ningún remedio efectivo contra la agresión de este hongo, la clave en este caso, es la prevención, procurando que en el cultivo, no se creen condiciones propicias que sea favorable para el hongo, cultivando en temperaturas que pasen los 25 y 30°C, para así generar adecuadas condiciones en prevenir el ataque del patógeno (63). Puesto que, la temperatura es una de los factores ambientales que repercute en la presencia de *F. oxysporum*, se puede manipular colocando una película de plástico transparente sobre el suelo húmedo durante días cálidos y soleados, con una temperatura de la capa superior por encima de 50°C, llegándose a calentar el suelo a profundidad hasta 30 cm, pudiéndose así la eliminación de su potencial nocivo (64).

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- De acuerdo al modelo de nicho ecológico para *Fusarium oxysporum*, se determinó que las variables temperatura promedio, precipitación anual y temperatura máxima media del periodo más cálido son las que más influyen en la distribución potencial de la especie.
- En la distribución geográfica potencial presente y futura, se pudo visualizar que actualmente la especie se distribuye hacia zonas de la región Costa ecuatoriana con mayor índice de adecuación, seguido de la Sierra. En los mapas de escenario actual y los escenarios del 2050, la especie mantiene su distribución y en el 2070 para el escenario extremo (RCP 8.5), existiría una expansión del hongo en la región Amazónica; en las regiones Costa y Sierra su probabilidad de distribución a futuro es alta a diferencia del escenario actual.
- Respecto a las variaciones en la extensión de la distribución potencial del patógeno, las mayores ampliaciones y contracciones de la distribución se observaron para ambos periodos (2050 y 2070) en el RCP extremo (8.5). La mayor expansión en 2050 se encuentra en el escenario extremo (RCP 8.5) con un área de 12496.51 km², la mayor contracción tuvo un área de 24795.45 km². Para el 2070, la mayor expansión se encuentra en el RCP 8.5 con un área de 33997.46 km² y la mayor contracción en el mismo escenario tuvo un área de 29865.06 km².

5.2. Recomendaciones

- Es importante que el país cuente con una base de datos sobre la distribución actual de *Fusarium oxysporum*, de esta forma se logra tener una idea clara acerca del avance del patógeno en las zonas más vulnerables del Ecuador; además de poder conocer futuras afectaciones a los cultivos de la parte continental del país.
- Seguir desarrollando este tipo de investigaciones que se enfocan en el estudio de la distribución geográfica de patógenos que ocasionan enfermedades serias como el Mal de Panamá, de modo que se tengan datos actualizados sobre el avance de la enfermedad y así lograr diseñar medidas estratégicas que ayuden a prevenir su esparcimiento en el futuro.
- Fomentar el trabajo conjunto entre ministerios y otras organizaciones nacionales, a fin de que se logren acuerdos para el diseño e implementación de estrategias de prevención para evitar la distribución futura del Mal de Panamá por todas las regiones del Ecuador.
- Se recomienda trabajar con la herramienta Maxent en estudios relacionados con la distribución geográfica de especies, puesto que esta permite realizar análisis predictivos a futuro, pudiendo determinar el comportamiento futuro de la distribución potencial de varias especies en el país.
- Motivar a los estudiantes a desarrollar estudios en donde se fomente el uso de herramientas de Sistema de Información Geográfica, de esta forma se contribuye al desarrollo de sus capacidades tanto intelectuales como físicas; lo que a su vez forma profesionales capaces de desenvolverse en áreas en las que se trabaje con análisis espaciales.

BIBLIOGRAFÍA

1. Maryani N, Lombard L, Poerba Y, Subandiyah S, Crous P, Kema G. Phylogeny and genetic diversity of the banana Fusarium wilt pathogen *Fusarium oxysporum* f.sp. *cubense* in the Indonesian centre of origin. ScienceDirect. 2019.
2. Espinoza L, Jiménez M, Peralta E. Conservación de Agentes Patógenos y Epífitos Presentes en los Cultivos de Tomate, Sandía y Banano y sus Beneficios para la Investigación. Revista Tecnológica-ESPOL. 2009.
3. Martínez-Quintero B, Echeverri-Rubio A, Gaviria-Ortiz F. Distribución potencial de *Oxysternon conspicillatum* (weber, 1801) en diferentes escenarios de cambio climático en Colombia. Boletín Científico del Centro de Museos. 2017.
4. Cadilhac L, Torres R, Calles J, Vanacker V, Calderón E. Desafíos para la investigación sobre el cambio climático en Ecuador. Neotropical Biodiversity. 2017.
5. Barros S, Javier. Qué es y cómo ataca el Fusarium [Seminis].; 2017.. Disponible en: <https://www.seminis.mx/blog-que-es-y-como-ataca-el-fusarium/>.
6. Urias C. Marchitez por Fusarium en banano (*Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Raza 4 Tropical). Organismo Internacional Regional de Sanidad Agropecuaria. 2020;; p. <https://www.oirsa.org/informacion.aspx?id=86>.
7. Hernández AA, Pineda AL, Noriega-Córdova H. Aislamiento e identificación de *Fusarium oxysporum* obtenidos de zonas productoras de "ají paprika" *Capsicum annum* L. (Solanaceae) en el distrito de Barranza, Perú. Arnaldoa.; 2019..
8. Takken F. The arms race between tomato and *Fusarium oxysporum*. Revista de Patología. 2012;; p. 11 (2), 309-314.
9. Hwang S, Ko W. Cavendish banana cultivars resistant to Fusarium wilt acquired through somaclonal variation in Taiwan. Journal of American Phytopathological. 2004; 6(8): p. 580-588.

10. Rodríguez M. El mayor enemigo de las musaceas parece haber llegado al continente americano, *Fusarium oxysporum* f. sp. *Cubense* RT4. [Online].; 2020.. Disponible en: <https://www.croplifela.org/es/plagas/listado-de-plagas/el-mayor-enemigo-de-las-musaceas-parece-haber-llegado-al-continente-americano>.
11. Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. Marchitez por *Fusarium* raza 4. 2015.
12. Clavijo S. Búsqueda de resistencia a la pudrición causada por *Fusarium* spp. en *Capsicum* (tesis de posgrado). Universidad Nacional de Colombia. 2014.
13. Universidad Nacional de Colombia. *Fusarium Oxysporum* el hongo que nos falta conocer. 2011.
14. Belete E. Associations of biophysical factors with faba bean root rot (*Fusarium solani*) epidemics in the northeastern highlands of Ethiopia. *Journal Crop Protection*. 2015;; p. 52(3), 39-46.
15. Caligiore Gei PF, Valdez JG, Piccolo RJ, Galmarini CR. Influence of *Fusarium* spp. isolate and inoculum density on resistance screening tests in onion. *Tropical Plant Pathology*. 2014.
16. Chehri k, Salleh B, Zakaria. Morphological and phylogenetic analysis of *Fusarium* species complex in Malaysia. *Journal Microbial Ecology*. 2015;; p. 96, 457-471.
17. Berruezo L. Caracterización morfológica, biológica y molecular de los complejos *Fusarium oxysporum* y *Fusarium solani* asociados al cultivo de *Nicotiana tabacum* L. en el Noroeste Argentino (tesis doctoral). CONICET Repositorio Institucional. 2018.
18. Sánchez C, Ana B. “Medidas de prevención y contingencia de *Fusarium oxysporum* raza 4 en el cultivo de Banano, en la hacienda Elbas”. Babahoyo; 2020..
19. Ploetz R. Management of *Fusarium* wilt of banana: A review with special reference to tropical race 4. *Journal Crop Protection*. 2015;; p. 73, 7-15.
20. [OIRSA] OIRdSA. Marchitez por *Fusarium* en banano (*Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Raza 4 Tropical). 2016.

21. Maymon M. First report of *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense tropical race 4 causing *Fusarium* wilt of Cavendish bananas in Israel. *Journal Plant disease*. 2018;; p. 102(12), 2655.
22. Ordoñez N. The phylogeography of the banana *Fusarium* wilt pathogen *Fusarium oxysporum* f.sp. cubense (tesis doctoral). Wageningen University & Research. 2018.
23. Aquino Albert P, Bandoles Genny G, Virma Anne L. R&D and Policy Directions for Effective Control of *Fusarium* Wilt Disease of Cavendish Banana in the Asia-Pacific Region.; 2013..
24. Chen X. Socioeconomic impact of *Fusarium* wilt on Cavendish banana in China. Davao City. Philippines. 2013;; p. 11-15.
25. Altenorf S. La marchitez del banano por *Fusarium* Raza 4 Tropical. 2019.
26. Martínez E. El nicho ecológico y la abundancia de las especies. 2014.
27. Coppini María V. Hábitat y nicho ecológico ¿En qué se diferencian? *Geoinnova*. 2017.
28. Mark P. Definición de nicho ecológico. 2018.
29. Gutiérrez-hernandez O, Senciales-gonzález J, Camacho-Olmedo M, et , al. Málaga Mediante Modelos De Nicho Ecológico a Partir de Registros de Presencia y Variables Ambientales in Situ y Ex Situ. 2016.
30. Soberón J, Osorio J, Peterson T. Diferencias conceptuales entre modelación de nichos y áreas de distribución. 2017.
31. Iloldi P, Escalante T. De los modelos de nicho ecológico a las áreas de distribución geográfica. *Biogeografía* 3. 2008;; p. 7-12.
32. Pliscoff PFCT. Modelación de la distribución de especies y ecosistemas en el tiempo y en el espacio: una revisión de las nuevas herramientas y enfoques disponibles. 2011;; p. 48:61-79.

33. Morales N, S. Modelos de distribución de especies: Software Maxent y sus aplicaciones en conservación. *Rev Conserv Ambient*. 2012;; p. 2(1): 1-3.
34. Hijmans R, Cameron S, Parra J, Jones P, Jarvis A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *J.Climatol*. 2005; 25: p. 1965-1978.
35. Flores H, Chávez A, Ruiz J, Mora C, Rodríguez V. Efecto del cambio climático sobre las zonas de riesgo por marchitez en el Agave tequilana Weber variedad Azul en Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 2016; 2: p. 497-510.
36. Ortega S, Hernández J, Sandoval J, Ayala V, Soto L, Alejo A. Distribución y frecuencia de organismos asociados a la enfermedad "Pata Prieta" de la Jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) en Guerrero, México. *Revista Mexicana de Fitopatología*. 2015; 33(2).
37. Miranda B. Fusarium R4T, el devastador hongo por el que declaran la primera emergencia nacional en América Latina y que preocupa a la industria del banano. *BBC NEWS*. 19 agosto 2019.
38. Shaw M, Osborne T. Geographic distribution of plant pathogens in response to climate change. *Journal Plant Pathology*. 2011; 60: p. 31-43.
39. Jiménez R, Jiménez M, Landa B, Castillo P, Navas J. Fusarium wilt of chickpea; en: *Compendium of Chickpea and Lentil Diseases*. APS Press.St. Paul. 2011; 160.
40. Grulke N. The nexus of host and pathogen phenology: understanding the disease triangle with climate change. *Journal New Physiologist*. 2011; 189: p. 8-11.
41. Nelson P. Life cycle and epidemiology of *Fusarium oxysporum*. *Journal Academic Press*. 1891.
42. Sánchez M. Distribución potencial de especies exóticas invasoras en Ecuador Continental ante escenarios de cambio climático. [Universidad Técnica Estatal de Quevedo].; 2018.. Disponible en: <https://repositorio.uteq.edu.ec/bitstream/43000/3243/1/T-AGROP-UTEQ-00101.pdf>.

43. Ibarra J, Rangel G, González F, Anda J, Martínez E, Macías H. Uso del modelado de nicho ecológico como una herramienta para predecir la distribución potencial de *Microcystis* sp (cianobacteria) en la Presa Hidroeléctrica de Aguamilpa, Nayarit, México. *Revista Ambiente & Agua*. 2012; 7(1).
44. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Ecuador trabaja para hacer frente a la Fusariosis del banano.; 2014.. Disponible en: <http://www.fao.org/agronoticias/agro-noticias/detalle/es/c/261298/>.
45. Agrocalidad. Plan Nacional de Contingencia para *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense (Foc R4T).; 2013.. Disponible en: <http://www.agrocalidad.gob.ec/wp-content/uploads/2014/10/plan-decontingencia-completo-revision-1.pdf>.
46. López K. Desde Ecuador se fortalecen las capacidades de diagnóstico del *Fusarium* R4T.; 2019.. Disponible en: <http://www.camae.org/bananeros/desde-ecuador-se-fortalecen-las-capacidades-de-diagnostico-del-fusarium-r4t/>.
47. Magdama F. *Fusarium oxysporum*, el hongo más temido en la industria del banano. *Revista Científica Ecuatoriana*. 2019; 6.
48. Córdova. Ecuador blindo su banano contra la plaga *Fusarium*. *La Hora*. 14 julio 2019.
49. Manangón L. Proyecto Fontagro productores de lulo y mora competitivos mediante selección participativa de clones élite, manejo integrado de cultivos y fortalecimiento de cadena de valor.; 2009.. Disponible en: <https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/2445/1/iniapscP.M266p2008.pdf>.
50. GBIF.org. GBIF. [Online].Acceso 2019 de Noviembre de 2019. Disponible en: <https://doi.org/10.15468/dl.clniro>.
51. Goldyn , Ríos Guayasamín P, Aguirre Sanchez K, Hepting L. Notes on the distribution and invasion potential of *Achatina fulica* Bowdich, 1822 (Gastropoda: Pulmonata: Achatinidae) in Ecuador. *Folia Malacologica*. 2016; 24(2); p. 85-90.
52. Osorio-Olvera L, Lira - Noriega A, Soberón J, Townsend Peterson A, Falconi M, Contreras - Díaz R, et al. NicheToolBox R [ntbox: un paquete R con interfaz gráfica

de usuario para modelar y evaluar nichos ecológicos multidimensionales.].; 2020..
Disponible en: <https://github.com/luismurao/ntbox>.

53. ESRI. ESRI. ArcGIS Desktop: Release 10.1. Environmental Systems Research Institute. Redlands, CA; 2011..
54. Phillips SJ, Anderson RP, Dudík M, Schapire RE, Blair ME. Opening the black box: an open-source release of Maxent. *Ecography*. 2017; 40: p. 887-893.
55. Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático. Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático..: Cambridge University Press; 2013..
56. Peterson AT, Soberón J, Pearson RG, Anderson RP, Martínez E, Nakamura M, et al. Ecological Niches and Geographic Distributions. *Monographs in Population Biology*. 2011;; p. 314.
57. Jeschke JM, Straye DL. Usefulness of bioclimatic models for studying climate change and invasive species. *Acad Sci*. 2008; 1134(1): p. 1-24.
58. Vicente JR, Alagador D, Guerra C, Alonso JM, Kueffer C, Vaz AS, et al. Cost-effective monitoring of biological invasions under global change: a model-based framework. *J Appl Ecol*. 2016.
59. Phillips S, Anderson R, RE S. Maximum entropy modeling of species geographic diatributions. *Ecol Modell [Internet]*. 2006 .
60. Pérez V, Porras A. Impacto potencial del cambio climático sobre las plagas de bananos y plátanos en Cuba. *Redalyc.org*. 2015.
61. Fernández DJ. “Estudio de la interacción de *Fusarium* spp. con cultivares de garbanzo (*Cicer arietinum* L.) asociados a la Fusariosis Vascular mediante técnicas biotecnológicas”. Tesis Doctoral. Córdoba.

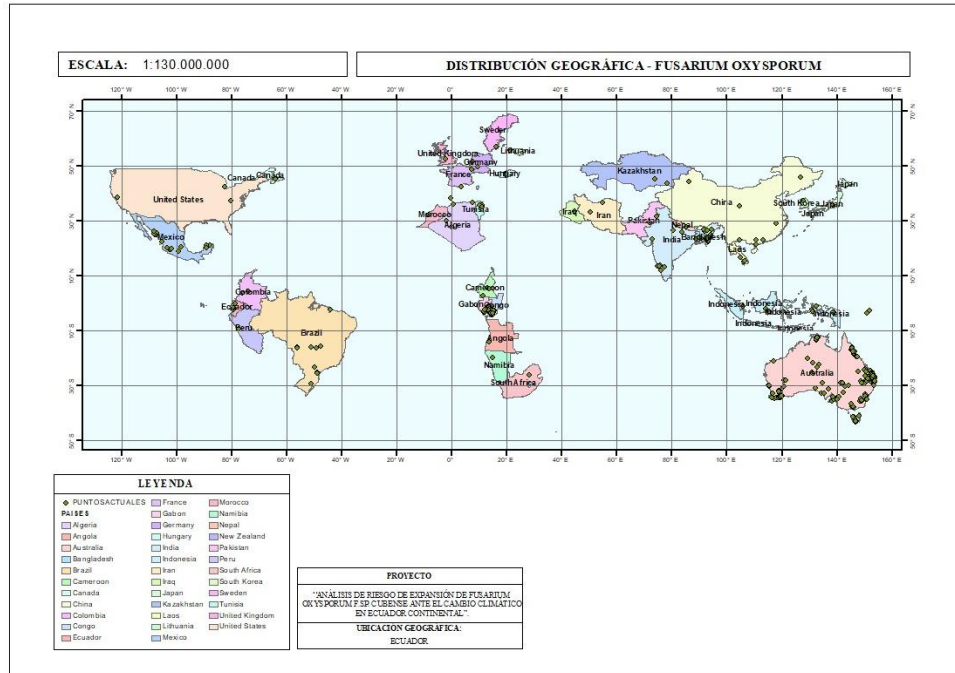
62. Andrea L V, Santiando R R. [Geografía y clima del Ecuador. BIOWEB. Pontificia Universidad Católica del Ecuador].; 2018. Acceso 31 de Enero de 2019. Disponible en: <https://bioweb.bio/geografiaClima.html/>.
63. Worms B. Dinafem.org. [Online] Acceso 31 de Enero de 2017. Disponible en: <https://www.dinafem.org/es/blog/combater-fusarium-plantas-marihuana-cannabis-hongos/#:~:text=Puedes%20desinfectar%20el%20suelo%20aplicando,litro%20de%20agua%2C%20ser%C3%A1%20suficiente.>
64. Ramiro D, Vásconez. “Técnicas De Prevención Y Control De Fusarium Oxysporum F.Sp. Dianthi En Clavel Dianthus Caryophyllus Y Su Incidencia En La Productividad”. Tesis de Grado. Ambato.2010.
65. Valencia H. Fusarium Oxysporum el hongo que nos falta conocer. Acta Biológica Colombiana. 2001.
66. Correoso M, Coello M. Modelación y Distribución de Lissachatina Fulica (Gastropoda, Achatinidae) en Ecuador. Potenciales Impactos Ambientales y Sanitarios.; 2009..
67. iNaturalist.org. iNaturalist. [Online].; 2008.. Disponible en: <https://www.inaturalist.org/>.
68. Sotomayor Herrera IA. Repositorio INIAP. [Online].; 2012.. Disponible en: <https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/3373/1/BD-418.pdf>.
69. Martínez Quintero G, Echeverri Rubio , Gaviria Ortiz FG. Boletín Científico del Centro de Museos. [Online].; 2017..
70. Gordon T. Fusarium oxysporum and the Fusarium wilt syndrome. Journal Phytopathology. 2017; 55: p. 23-39.
71. López S,yCJ. Manejo integrado del mal de Panamá (Fusarium oxysporum). Revista Actualidad U.D.C.A y Divulgación Científica. 2019; 22(2): p. 1240.
72. Loaiza S, Christian R. Área de vida, distribución potencial y estado de conservación de Espostoa frutencens. Ecología Aplicada. 2017; 16(1): p. 1-7.

73. Correia M. Criterios confiables para la construcción del modelo de máxima entropía (MAXENT) orientados a la pesquería con red de cerco en el Pacífico Oriental. Revista de la Universidad de Sinaloa. 2019; 3.
74. Zúñiga V. Estimación del riesgo de tres fincas bananeras en la provincia de Los Ríos para el Mal de Panamá (FOC RT4) para la elaboración de un plan de respuesta de erradicación (tesis de pregrado).: Escuela Superiores Politécnica del Litoral; 2015.. Disponible en: <https://dspace.espol.edu.ec/retrieve/89203/D-88079.pdf>.
75. Arellano M. Detección de *Fusarium oxysporum* en cultivos de uvilla (*Physalis peruviana* L.) en la Sierra norte y centro del Ecuador (tesis de pregrado).: Universidad Católica del Ecuador; 2018.. Disponible en: <http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/14683/Detecci%C3%B3n%20de%20Fusarium%20oxysporum%20en%20cultivos%20de%20uvilla%20%28Physalis%20peruviana%20L.%29%20en%20la%20Sierra%20norte%20.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
76. Maymon M, Sela N, Shpatz U, et al. The origin and current situation of *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense tropical race 4 in Israel and the Middle East. Scientific Reports. 2020.
77. Fick S, Hijmans R. WorldClim2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology; 2017.
78. Mateo R, Felicísimo A, Muñoz J. Modelos de distribución de especies: una revisión sintética. Revista Chilena de Historia Natural. 2011; 84(2): p. 217-240.
79. Fravel D, Olivian C, Alabouvette C. *Fusarium oxysporum* and its biocontrol. Journal New Phytologist. 2003; 157: p. 493-502.
80. García F, Pachacama S, Jarrín D, et al. *Fusarium oxysporum* f.sp. cubense (syn. *Fusarium odoratissimum*) agente causal de la marchitez por *Fusarium* en musáceas (plátanos y bananos). Guía Andina para el diagnóstico de *Fusarium* Raza 4 Tropical (R4T). 2020.

81. Plasencia A,EG,EL. Modelación de la distribución geográfica potencial de dos especies de psitácidos neotropicales utilizando variables climáticas y topográficas. *Acta Zoológica Mexicana*. 2014; 30(3).

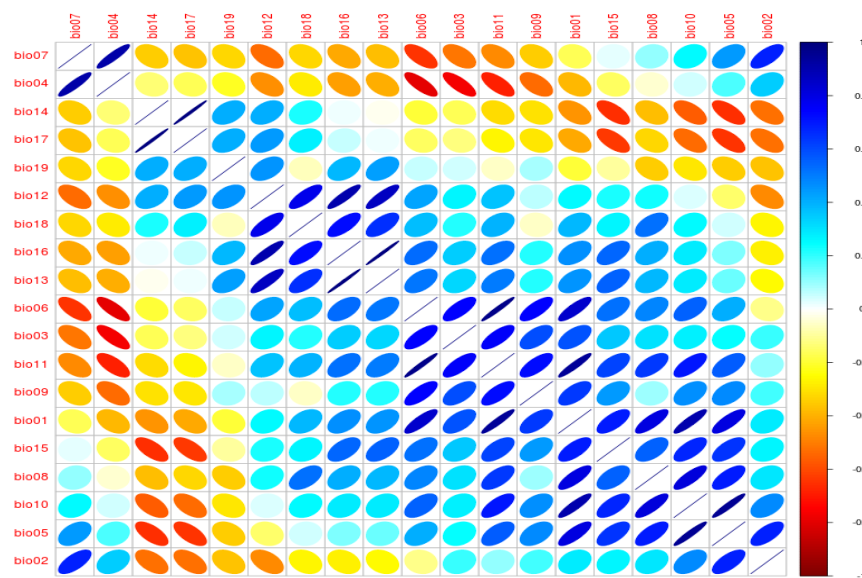
ANEXOS

Anexo 1. Países donde se encuentra registros en línea de *Fusarium oxysporum*.



Fuente: Autora.

Anexo 2. Análisis de correlaciones entre los valores de las variables bioclimáticas de los puntos de presencia de la especie *Fusarium oxysporum* F.sp. cubense.



Fuente: NicheToolBox