



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO
DOCTORADO EN CIENCIAS AGROPECUARIAS



**ESTIMACIÓN DE ESCENARIOS DE RIESGO DE PLAGAS DE
INTERÉS CUARENTENARIO (2019-2021) MEDIANTE
INTELIGENCIA GEOESPACIAL**

T E S I S

**que como requisito parcial para obtener el grado de
Doctor en Ciencias Agropecuarias**

Presenta

M.S.P. Enrique Ibarra Zapata

Soledad de Graciano Sánchez, S.L.P.

Julio, 2022



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO
DOCTORADO EN CIENCIAS AGROPECUARIAS



**ESTIMACIÓN DE ESCENARIOS DE RIESGO DE PLAGAS DE
INTERÉS CUARENTENARIO (2019-2021) MEDIANTE
INTELIGENCIA GEOESPACIAL**

T E S I S

**que como requisito parcial para obtener el grado de
Doctor en Ciencias Agropecuarias**

Presenta

M.S.P. Enrique Ibarra Zapata

Director de Tesis: Dr. Carlos Arturo Aguirre-Salado

Asesora: Dra. Liliana Miranda-Aragón

Asesor: Dr. Martín Escoto-Rodríguez

Asesora: Dra. Catarina Loredó-Osti

Asesor externo: Dr. Gustavo Mora-Aguilera

Licencia Creative Commons DCA



Estimación de escenarios de riesgo de plagas de interés cuarentenario (2019-2021) mediante inteligencia geoespacial by: Ibarra-Zapata, Enrique; Aguirre-Salado, Carlos Arturo; Miranda-Aragón, Liliana; Escoto-Rodríguez, Martín; Loredó-Osti, Catarina y Mora-Aguilera, Gustavo. está licenciado bajo una Licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional.

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí por la oportunidad de cursar mis estudios de doctorado, particularmente al Comité Académico del Doctorado en Ciencias Agropecuarias por la aceptación en el programa doctoral. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo recibido a través de la Beca Nacional 792916.

A los profesores del programa de doctorado, por cada una de las materias impartidas quienes me brindaron sus conocimientos y experiencias para obtener las herramientas que me permitieron lograr la meta.

A la Dra. Catarina Loredó-Osti por la confianza brindada al recibirme en la Facultad de Agronomía y Veterinaria, por confiar en la investigación propuesta en aquel lejano 2018 y sugerirme al Dr. Carlos Aguirre para trabajar el tema de la tesis relacionado con el uso de los sistemas de información geográfica aplicado a la agricultura. Por las palabras de ánimo compartidas en los momentos difíciles de esta travesía, así como por las atinadas observaciones a la presente tesis.

Al Dr. Carlos Arturo Aguirre-Salado, mi director de tesis, por los conocimientos compartidos, las mañanas/tardes/noches de trabajo, por haber revisado esta tesis, primero con un cincel grueso, y luego con un cincel fino, por transmitirme el valor de la escritura explícita y estructurada, por afinar mi ojo clínico, por afilar mi bisturí, por enseñarme las claves para lograrme formar como un investigador independiente, por las palabras de ánimo que fueron necesarias en momentos complicados, por motivarme con los finlandeses para lograr grandes metas, por estar al pendiente de mí en cada paso relacionado con el logro de este objetivo. ¡Gracias por tanto doc!

A la Dra. Liliana Miranda-Aragón por las atinadas sugerencias realizadas a la presente investigación, por las enseñanzas compartidas en el examen predoctoral relacionadas con la necesidad de crear siempre textos nuevos y por los consejos brindados para la mejora de este documento.

Al Dr. Martín Escoto-Rodríguez por las atinadas sugerencias que enriquecieron el valor del trabajo de investigación, por las observaciones realizadas a este escrito y el trato amigo que siempre me brindó.

Al Dr. Gustavo Mora-Aguilera por aceptar participar en este proyecto como mi asesor externo y brindarme sus conocimientos de una manera generosa, por los momentos compartidos de la vida, y por las extraordinarias sugerencias que matizaron el enfoque de este trabajo de investigación desde el punto de vista de la Sanidad Vegetal.

Al personal oficial del Organismo Internacional Regional de Sanidad Agropecuaria (OIRSA), Dr. Carlos Ramón Urías Morales (Director Regional de Sanidad Vegetal), M.C. Nancy Villegas Jiménez (Coordinadora Regional de Análisis de Riesgo en OIRSA), así como al Ing. César Ramos Méndez, (Oficial Agrosanitario del OIRSA), quienes con su experiencia en el tema de plagas de las musáceas contribuyeron en el trabajo relacionado con el análisis espacial de riesgo fitosanitario de la fusariosis de las musáceas en el mundo, con énfasis en América Pantropical.

Al personal del Programa de Operaciones y Funciones Sustanciales (POFS) del Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA), M.C. Rigoberto González Gómez, I.A.E.P.A Jaime Díaz López y I.A.E.P.A. Javier Álvarez Castañeda, quien contribuyeron con su experiencia en temas de vigilancia epidemiológica fitosanitaria, particularmente en la elaboración del análisis de riesgo espacial del cancro de los cítricos.

Al Ing. Francisco Ramírez y Ramírez, Director General de Sanidad Vegetal del Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA), quien fue fundamental para mi desarrollo profesional desde el año 2008, motivándome a trabajar con el tema de modelación geoespacial de plagas agrícolas, y quien de manera atinada y muy acuerdo con su experiencia tuvo a bien sugerirme trabajar adicionalmente con la plaga exótica del Avispón Gigante Asiático.

Al Dr. Alejandro Iván Aguirre Salado del Instituto de Física y Matemáticas de la Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán, Oaxaca, México quien contribuyó en la parte teórica del modelado por máxima entropía.

Al Dr. Marcos Casiano Domínguez, postdoctorante de la Facultad de Agronomía y Veterinaria que contribuyó en el componente metodológico del análisis de riesgo fitosanitario de la Fusariosis de las Musáceas.

Al Ing. en Geomática Juan José Silva Gallegos quien contribuyó en la parte de percepción remota en el análisis del riesgo fitosanitario de las zonas prioritarias en dispersión de la Mosca del Mediterráneo.

DEDICATORIA

Dedico los días de trabajo y las noches de desvelo invertidos en esta tesis a:

A Dios por darme el razonamiento y la capacidad de afrontar retos y salir adelante.

A mis seres amados que ya no están † EIR, AIR...∞

A mi familia quien fue un pilar muy importante, y que en todo momento estuvo a mi lado, dándome palabras de aliento, especialmente a mis tres mujeres: Amacita (Silvia), Amor (Faa) y Amorcita (Naara Zazil), quienes nunca me han dejado sólo y están conmigo incondicionalmente.

Solo Dios sabe cuando hace coincidir los caminos de las personas que pudieran ser significativas en la vida, aquellas que te dejan mucho y se les toma un enorme aprecio.

LISTA DE ARTÍCULOS ORIGINALES QUE EMANAN DE ESTA TESIS

1. ARTÍCULO DE DIVULGACIÓN PREPARADO como: Ibarra-Zapata, E., Aguirre-Salado, C.A. y Mora-Aguilera, G. Cultivos sanos, mesas llenas: el enfoque geoespacial de la protección vegetal en los organismos regionales de protección fitosanitaria, PARA SOMETERSE A ARBITRAJE.
2. ARTÍCULO DE DIVULGACIÓN PREPARADO como: Ibarra-Zapata, E., Aguirre-Salado, C.A. y Mora-Aguilera, G. Amenazas cuarentenarias de la citricultura mexicana: cancro, mancha negra, y clorosis variegada de los cítricos, PARA SOMETERSE A ARBITRAJE.
3. ARTÍCULO DE DIVULGACIÓN PREPARADO como: Ibarra-Zapata, E., Mora-Aguilera, G. Aguirre-Salado, C.A. Plátano Mexicano en riesgo: las principales amenazas cuarentenarias de las musáceas, PARA SOMETERSE A ARBITRAJE.
4. ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN PUBLICADO en REVISTA CONACYT-SCOPUS como: Ibarra-Zapata, E., Aguirre-Salado, C.A., Miranda-Aragón, L., Escoto-Rodríguez, M., Loredó-Osti, C., Mora-Aguilera, G., Casiano-Domínguez, M., Aguirre-Salado, A.I., Ramos-Méndez, C., Villegas-Jiménez, N., Urías-Morales, C.R., y González-Gómez, R. 2021. Análisis geoespacial fitosanitario de la Fusariosis de las Musáceas a nivel global, con énfasis en América Pantropical. *Investigaciones Geográficas del Instituto de Geografía de la UNAM*: e60466. DOI: [dx.doi.org/10.14350/ig.60466](https://doi.org/10.14350/ig.60466)
5. ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN PUBLICADO en REVISTA JCR como: Ibarra-Zapata, E., Aguirre-Salado, C.A., Miranda-Aragón, L., Loredó-Osti, C., Escoto-Rodríguez, M. y Ramírez y Ramírez, F. 2022. Mapeo de una posible amenaza para el sector agrícola mexicano: avispon gigante asiático *Vespa mandarinia* (Smith 1852) (Hymenoptera: Vespidae). *Revista de la Sociedad Entomológica Argentina*. 81(1):1–18, 2022. <https://doi.org/10.25085/rsea.810101>.
6. ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN PREPARADO como: Ibarra-Zapata, E., Aguirre-Salado, C.A., Loredó-Osti, C., Escoto-Rodríguez, M., Miranda-Aragón, L., Mora-Aguilera, G., González-Gómez, R., Álvarez-Castañeda, J. y Díaz-López, J. Modelado espacial fitosanitario del cancro de los cítricos (*Xanthomonas citri* p.v. *citri* en la planicie costera del Golfo de México, PARA SOMETERSE A ARBITRAJE.
7. ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN PREPARADO como: Ibarra-Zapata, E., Aguirre-Salado, C.A., Miranda-Aragón, L., Loredó-Osti, C., Escoto-Rodríguez, M., Mora-Aguilera, G. y Silva-Gallegos, J.J. Modelado del tiempo fisiológico de *Ceratitis capitata* en territorios estratégicos de Latinoamérica, PARA SOMETERSE A ARBITRAJE.

CONTENIDO

	Página
Índice de Figuras	x
Índice de Cuadros	xiii
Resumen	xv
Abstract	xvi
INTRODUCCIÓN	1
Hipótesis	3
Objetivos	4
Literatura citada	5
CAPÍTULO 1. CULTIVOS SANOS, MESAS LLENAS: EL ENFOQUE GEOESPACIAL DE LA PROTECCIÓN VEGETAL EN LOS ORGANISMOS REGIONALES DE PROTECCIÓN FITOSANITARIA	
Resumen	8
Abstract	8
1.1. Introducción.....	8
1.2. El contexto global de la protección fitosanitaria.....	9
1.3. El papel de las ORPF en la estimación de escenarios de riesgo de plagas y enfermedades agrícolas.....	9
1.3.1. Comisión de Protección Fitosanitaria de Asia y el Pacífico (APPPC).....	10
1.3.2. Comunidad Andina (CAN).....	10
1.3.3. Comité de Sanidad Vegetal del Sur (COSAVE).....	10
1.3.4. Organización de Protección Vegetal del Cercano Oriente (NEPPO).....	10
1.3.5. Organización Europea y Mediterránea de Protección Fitosanitaria (EPPO).....	10
1.3.6. Consejo Fitosanitario Interafricano (IAPSC).....	11
1.3.7. Organización Norteamericana de Protección de las Plantas (NAPPO).....	11
1.3.8. Organismo Internacional Regional de Sanidad Agropecuaria (OIRSA).....	11
1.3.9. Organización de Protección Fitosanitaria para el Pacífico (PPPO).....	11
1.4 Conclusiones.....	12
1.5 Literatura citada.....	13
CAPÍTULO 2. AMENAZAS CUARENTENARIAS DE LA CITRICULTURA MEXICANA: CANCRO, MANCHA NEGRA, Y CLOROSIS VARIEGADA DE LOS CÍTRICOS	
Resumen	15
Abstract	15
2.1. Introducción.....	15
2.2. Plagas cuarentenarias de los cítricos, un riesgo fitosanitario para la citricultura mexicana.....	16

2.3.	El principio espacial y condición fitosanitaria de las amenazas cuarentenarias de los cítricos mexicanos.....	19
2.4.	Patrones espaciales de la importación de cítricos en el contexto global.....	20
2.5.	Estrategias preventivas ante las plagas cuarentenarias de los cítricos realizadas por el Organismo Nacional de Protección Fitosanitaria Mexicano.....	20
2.6.	Conclusiones.....	21
2.7.	Literatura citada.....	22

CAPÍTULO 3. PLÁTANO MEXICANO EN RIESGO: LAS PRINCIPALES AMENAZAS CUARENTENARIAS DE LAS MUSÁCEAS

Resumen	.....	25
Abstract	.....	25
3.1.	Introducción.....	26
3.2.	El contexto del cultivo de plátano en el mundo.....	26
3.3.	Amenazas cuarentenarias prioritarias para el cultivo de plátano mexicano.....	28
3.4.	Condición espacial de las amenazas cuarentenarias del plátano prioritarias para México.....	29
3.5.	Situación del sistema producto plátano en México.....	30
3.6.	La cultura de la prevención en México.....	32
3.7.	Conclusiones.....	33
3.8.	Literatura citada.....	33

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS GEOESPACIAL FITOSANITARIO DE LA FUSARIOSIS DE LAS MUSÁCEAS A NIVEL GLOBAL, CON ÉNFASIS EN AMÉRICA PANTROPICAL

Resumen	.....	36
Abstract	.....	36
4.1.	Introducción.....	37
4.2.	Materiales y métodos.....	37
4.3.	Resultados y discusión.....	41
4.4.	Conclusión.....	51
4.5.	Literatura citada.....	51
4.6.	Fuente de datos.....	53

CAPÍTULO 5. MAPEO DE UNA POSIBLE AMENAZA PARA EL SECTOR AGRÍCOLA MEXICANO: AVISPÓN GIGANTE ASIÁTICO *Vespa mandarinia* (Smith 1852) (Hymenoptera: Vespidae)

Abstract	.....	55
Resumen	.....	55
5.1.	Introducción.....	55
5.2.	Materiales y métodos.....	57
5.2.1.	Zona de estudio.....	57

5.2.2.	Metodología.....	58
5.3.	Resultados.....	60
5.3.1.	Riesgo sanitario bajo.....	61
5.3.2.	Riesgo sanitario medio.....	63
5.3.3.	Riesgo sanitario alto.....	64
5.3.4.	Riesgo sanitario muy alto.....	65
5.4.	Discusión.....	66
5.5.	Conclusión.....	68
5.6.	Literatura citada.....	69

CAPÍTULO 6. PATRONES ESPACIALES DE RIESGO FITOSANITARIO ASOCIADO AL CANCRO DE LOS CÍTRICOS (*Xanthomonas citri*) EN LA PLANICIE COSTERA DEL GOLFO EN LA REPÚBLICA MEXICANA

Resumen	.....	73
Abstract	.....	73
6.1.	Introducción.....	74
6.2	Región de estudio.....	75
6.3.	Materiales y métodos.....	76
6.4.	Resultados.....	80
6.5.	Discusión.....	85
6.6.	Conclusiones.....	87
6.7.	Literatura citada.....	88

CAPÍTULO 7. MODELADO DEL TIEMPO FISIOLÓGICO DE *Ceratitis capitata* EN TERRITORIOS ESTRATÉGICOS DE LATINOAMÉRICA

Resumen	.....	91
Abstract	.....	92
7.1.	Introducción.....	92
7.2.	Materiales y métodos.....	94
7.3.	Resultados.....	95
7.4.	Discusión.....	98
7.5.	Conclusión.....	99
7.6.	Literatura citada.....	100

CAPÍTULO 8. DISCUSIÓN Y CONSIDERACIONES FINALES 102

8.1.	Literatura citada.....	107
------	------------------------	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
Capítulo 1		
Figura 1.1	Países miembros de la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria.....	9
Figura 1.2	Organismos Regionales de Protección Fitosanitaria: a) APPPC, b) CAN, c) COSAVE, d) NEPPO, e) EPPO, f) IAPSC, g) NAPPO, h) OIRSA, i) PPPO.	12
Capítulo 2		
Figura 2.1	Distribución mundial de PCC bajo vigilancia epidemiológica fitosanitaria activa en México para el año 2020 (Cancro de los Cítricos, Clorosis Variegada de los Cítricos y Mancha Negra de los Cítricos).....	19
Figura 2.2	Importaciones de cítricos según las fracciones arancelarias “0805.10.01” y “0814.00.01” de países que mantienen un estatus fitosanitario presente de PCC (Cancro de los Cítricos, Clorosis Variegada de los Cítricos y Mancha Negra de los Cítricos) y ausentes en México para el año 2020.....	21
Capítulo 3		
Figura 3.1	Panorama mundial del cultivo de plátano. a) Superficie sembrada de plátano por país y b) Producción de plátano por país.....	27
Figura 3.2	Condición espacial de las principales amenazas cuarentenarias para el sistema producto de plátano en México.....	30
Figura 3.3	Superficie sembrada del sistema producto plátano en México.....	31
Figura 3.4	Producción de plátano en México.....	32
Capítulo 4		
Figura 4.1	Modelo de Máxima Entropía. Aptitud climática del patógeno (superior) y Aptitud climática del hospedante (inferior).....	42
Figura 4.2	Modelo de PDE por movilidad de material vegetativo (género <i>Musa</i>).....	43
Figura 4.3	Áreas focales y superficies prioritarias en RF_FocR4T muy alto en el mundo (> 0.9).....	44
Figura 4.4	Distribución espacial del RF_FocR4T en América pantropical.....	44
Figura 4.5	Regiones prioritarias con mayor RF_FocR4T en América pantropical.....	49

Capítulo 5		Página
Figura 5.1	Conformación territorial de México.....	57
Figura 5.2	Distribución espacial de cultivos alimenticios del sector agrícola en México según porcentaje de polinización (CA-SAM-PP). Superficie sembrada (mapa ubicado del lado izquierdo) y conglomerados (mapa de la esquina superior derecha): a) Grupo 1-10%, b) Grupo 11-40%, c) Grupo 41-91% y d) Grupo 91-100%.....	60
Figura 5.3	Distribución potencial del avispon gigante asiático en México, de acuerdo al componente ambiental. En la esquina superior derecha se muestra el análisis del área bajo la curva (AUC).....	62
Figura 5.4	Modelo cartográfico de riesgo sanitario bajo asociado al avispon gigante asiático y cultivos agroalimentarios con dependencia a la polinización entre 1 y 10%.....	63
Figura 5.5	Modelo cartográfico de riesgo sanitario medio asociado al avispon gigante asiático y cultivos agroalimentarios con dependencia a la polinización entre 11 y 40%.....	64
Figura 5.6	Modelo cartográfico de riesgo sanitario alto asociado al avispon gigante asiático y cultivos agroalimentarios con dependencia a la polinización entre 41 y 90%.....	65
Figura 5.7	Modelo cartográfico de riesgo sanitario muy alto asociado al avispon gigante asiático y cultivos agroalimentarios con dependencia a la polinización entre 91 y 100%.....	66
Capítulo 6		
Figura 6.1	Localización de la Planicie Costera del Golfo.....	75
Figura 6.2	Diagrama conceptual de la asociación espacial entre las coberturas de Eventos Meteorológicos Extremos (EME) ocurridos en el Océano Atlántico y Mar Caribe entre 2015 y 2018.....	77
Figura 6.3	Diagrama conceptual de la superposición de las coberturas de Potencial Productivo de Cítricos “PPC” (Naranja y Limón).....	78
Figura 6.4	Diagrama conceptual de la Evaluación Espacial Multicriterio (MCDE) de los criterios (C_n) que determinan los patrones espaciales del Riesgo Fitosanitario asociado al Cancro de los Cítricos <i>Xanthomonas citri</i> pv. <i>citri</i>	80

	Página	
Figura 6.5	Modelo Cartográfico de Distribución Potencial del Cancro de los Cítricos <i>Xanthomonas citri</i> pv. <i>citri</i> estimado por máxima entropía en la Planicie Costera del Golfo en México.....	81
Figura 6.6	Modelo Cartográfico de Potencial Productivo de Cítricos (PPC) “limón/naranja”, en la Planicie Costera del Golfo en México.....	82
Figura 6.7	Modelo Cartográfico de Dispersión Potencial del Inoculo asociado a los Eventos Meteorológicos Extremos (EME) ocurridos en el Océano Atlántico y Mar Caribe entre 2015 y 2018.....	83
Figura 6.8.	Modelo Cartográfico de Riesgo Fitosanitario asociado al Cancro de los cítricos <i>Xanthomonas citri</i> pv. <i>citri</i> en la Planicie Costera del Golfo en México.....	84
Figura 6.9	Cuadrantes prioritarios para la Vigilancia Epidemiología fitosanitaria en la PCG asociados al Riesgo fitosanitario de <i>Xanthomonas citri</i> en México. a) Riesgo Fitosanitario muy alto, b) Riesgo Fitosanitario alto, c) Riesgo Fitosanitario medio, d) Riesgo Fitosanitario bajo, e) Riesgo Fitosanitario muy bajo y f) Riesgo Fitosanitario mínimo.....	86

Capítulo 7

Figura 7.1	Zonas de atención estratégica de la Mosca del Mediterráneo en Centro y Norteamérica.....	93
Figura 7.2	Evolución espacio-temporal del factor térmico en escala regional.....	96
Figura 7.3	Comportamiento espacio-temporal de las Unidades Calor Acumuladas en los territorios estratégicos para la Mosca del Mediterráneo: a) Zona de erradicación, b) Zona de contención y c) Zona de contención potencial.....	98

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Capítulo 1	
Cuadro 1.1	Detecciones de plagas y enfermedades en México 2000-2015..... 4
Capítulo 2	
Cuadro 2.1	Plagas de los cítricos introducidas y establecidas en la citricultura mexicana que fueron sujetas a campañas fitosanitarias o de accionabilidad oficial por su carácter cuarentenario..... 17
Cuadro 2.2	Características de plagas cuarentenarias de los cítricos ausentes en México, bajo esquema de vigilancia epidemiológica activa..... 18
Capítulo 3	
Cuadro 3.1	Características de las principales amenazas cuarentenarias para el plátano Mexicano. a) Fusariosis de las Musáceas (<i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>cubense</i> , b) Marchitez Bacteriana del Plátano (<i>Xanthomonas vasicola</i> pv. <i>musacearum</i>) y c) Cogollo Racimoso del Banano (Banana bunchy top virus)..... 29
Capítulo 4	
Cuadro 4.1.	54 sitios de presencia de FocR4T empleados en la modelación de la ACP.... 39
Cuadro 4.2.	61 sitios de presencia del hospedante empleados en la modelación de la ACH..... 39
Cuadro 4.3.	Variabes bioclimáticas empleadas en la modelación de nicho ecológico.... 40
Cuadro 4.4.	Criterios empleados en la MCDA del RF_FocR4T..... 40
Cuadro 4.5.	Contribución porcentual e importancia de permutación de las variables empleadas en la modelación de Máxima Entropía del nicho ecológico del patógeno y hospedante..... 41
Cuadro 4.6.	Niveles de RF_FocR4T localizados en América pantropical..... 47
Cuadro 4.7.	Correlación de Pearson (r) entre el RF_FocR4T) contra las variables bioclimáticas de mayor contribución porcentual..... 50

Capítulo 5		Página
Cuadro 5.1.	Grupos de cultivos agroalimentarios del sector agrícola mexicano conforme porcentaje de polinización.....	58
Cuadro 5.2.	VARIABLES macroambientales utilizadas en el modelado de distribución potencial.....	59

Capítulo 6		
Cuadro 6.1.	VARIABLES macro ambientales para estimar la distribución potencial de <i>X. citri</i>	78
Cuadro 6.2.	Clasificación y asignación de pesos (W_j) en la estimación del riesgo fitosanitario de cancro de cítricos en la PCG en México.....	80

RESUMEN

La inteligencia geoespacial aplicada a la modelación de escenarios de riesgo de plagas o enfermedades agrícolas permite fortalecer la toma de decisiones en beneficio de la sanidad vegetal. En esta tesis se estimaron los escenarios de riesgo de algunas plagas y enfermedades de interés cuarentenario y económico bajo un enfoque multi-escala mediante el uso de sistemas de información geográfica. El Capítulo 1 describe el papel de los Organismos Regionales de Protección Fitosanitaria (ORPF) en torno a la implementación de la tecnología geoespacial en la prevención, manejo, contención o actuación como estrategia de apoyo a la protección fitosanitaria. El Capítulo 2 proporciona un escenario global de las amenazas cuarentenarias para la citricultura mexicana, mencionando los países donde se mantiene un estatus oficial presente y cuáles podrían ser los posibles medios para una introducción, establecimiento o dispersión de amenazas cuarentenarias como el cancro, mancha negra y clorosis variegada de los cítricos. En el Capítulo 3 se presenta un panorama global de las principales amenazas cuarentenarias de las musáceas, destacando cuál es su condición fitosanitaria y cuáles son las posibles vías de movilización de material infectivo, así mismo se muestran cuáles son las regiones productoras de plátano en México que podrían ser afectadas. En el Capítulo 4 se presenta el análisis geoespacial fitosanitario de la Fusariosis de las musáceas a escala global con énfasis en América pantropical, donde se realizó un modelado de similitud climática por máxima entropía (patógeno/hospedante), el potencial de daño económico integrados por la evaluación espacial multicriterio. El Capítulo 5 presenta el análisis de riesgo del avispon gigante asiático donde el modelado geoespacial consistió en la agrupación de cultivos según su dependencia a la polinización, y a su vez, a la estimación de la distribución potencial del avispon en México. El Capítulo 6 presenta el modelado espacial fitosanitario del cancro de los cítricos en la planicie costera del Golfo de México mediante un análisis multicriterio considerando patógeno/ambiente/hospedante. El Capítulo 7 presenta la modelación del riesgo de la mosca del Mediterráneo mediante la utilización de productos derivados de imágenes de satélite asociadas al componente térmico, ya que es una variable determinante en los primeros estadios y la reproducción. Para ello, se realizó un seguimiento espacio-temporal del tiempo fisiológico de la especie en territorios estratégicos delimitando territorios óptimos para su monitoreo o vigilancia epidemiológica en Centro América y en la porción sur de Norte América. Esta tesis demuestra la potencialidad del modelado espacial para dar sustento en la toma de decisiones en la disciplina de la sanidad vegetal, permitiendo territorializar el riesgo de plagas en virtud de su comportamiento epidémico a diferentes escalas geográficas, lo que sin duda incorpora un enfoque transdisciplinario, favoreciendo los criterios de decisión de los tomadores de decisiones en materia de salud de las plantas.

Palabras clave: Salud de las plantas, riesgo sanitario, métodos geográficos, modelado geoespacial.

ABSTRACT

Geospatial intelligence applied to model risk scenarios of agricultural pests or diseases is an approach that allows strengthening decision making in plant health management. In this thesis, risk scenarios of some pests and diseases of quarantine and economic interest were estimated under a multiscale approach using geographic information systems. Chapter 1 describes the role of Regional Plant Protection Organizations (RPPOs) in the implementation of geospatial technology in prevention, management, containment or action as a strategy to support plant protection. Chapter 2 provides a global scenario of quarantine threats to Mexican citriculture, mentioning the countries where an official status is present and what could be the possible means for an introduction, establishment or spread of quarantine threats such as citrus canker, black spot and variegated citrus chlorosis. Chapter 3 presents an overview of the main quarantine threats to musaceae, highlighting their phytosanitary status and possible pathways for the movement of infective material, as well as the banana-producing regions in Mexico that could be affected. Chapter 4 presents the geospatial phytosanitary analysis of Fusariosis of musaceae on a global scale with emphasis on pantropical America, where a modeling of climatic similarity by using the maximum entropy for both pathogen and host, and the potential for economic damage integrated by multicriteria spatial evaluation, were carried out. Chapter 5 presents the risk analysis of the Asian giant hornet where the geospatial modeling involved a grouping of crops according to their dependence on pollination, and in turn, to the potential distribution of the hornet in Mexico. Chapter 6 presents the spatial phytospatial modeling of citrus canker in the coastal plain of the Gulf of Mexico using a multi-criteria analysis considering the three factors involved pathogen/environment/host. Chapter 7 presents the risk modeling of the Mediterranean fruit fly using products derived from satellite images associated with the thermal component, since it is a determining variable in the early stages and reproduction. For this purpose, a spatio-temporal follow-up of the physiological time of the species in strategic territories was carried out, delimiting optimal territories for its monitoring or epidemiological surveillance in Central America and in the southern portion of North America. This thesis exhibits the potential of spatial modeling to support decision-making in the discipline of plant health, making it possible to territorialize the risk of pests by virtue of their epidemic behavior at the different geographical scales, which undoubtedly incorporates a transdisciplinary approach, supporting the decision-making process in plant health.

Keywords: Plant health, sanitary risk, geographic methods, geospatial modeling.

INTRODUCCIÓN

A escala mundial, normalmente existe una movilización natural de especies. Sin embargo, la dispersión de organismos que pueden ocasionar riesgos con posibles afectaciones se convierte en una preocupación, no solo para la sanidad vegetal, sino que también para la sanidad animal e incluso para la salud pública. En años recientes, la introducción, establecimiento y dispersión de organismos plaga se ha asociado principalmente al factor antrópico a consecuencia de los procesos de globalización. El trasiego de mercancías a escala global posibilita la dispersión de plagas y enfermedades agrícolas, ya que, de acuerdo con la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo (Heiblum-Robles, 2019) cerca del 80% del volumen del comercio mundial y más de 70% del valor del comercio mundial se transporta por mar, lo que implica, la existencia de más de 50.000 buques mercantes que transportan todo tipo de carga, fomentando las relaciones comerciales entre más de 150 países (IPS, 2016).

Cada año se pierde hasta un 40% de cultivos alimentarios a consecuencia de riesgos fitosanitarios (ONU, 2020), afectando a unos 600 millones de personas (FAO, 2018), con pérdidas de alrededor de unos 220 millones de dólares con repercusiones directas a la seguridad laboral y al crecimiento económico agrícola (Orchardson, 2019). Pero, ¿cómo podemos abordar esta problemática? De acuerdo con la Directora General Adjunta de la FAO, *“La salud de las plantas es la disciplina que utiliza una serie de medidas para controlar y prevenir que plagas, malezas, y organismos que causan enfermedades a cultivos alimentarios que se dispersan a nuevas áreas, ya sea por comercio internacional o por la acción del ser humano”* -María Helena Seme, 2018-

De acuerdo con SIAP (2022), la sanidad vegetal es clave para el desarrollo sostenible de la agricultura, y así poder asegurar la alimentación de la población mundial en el 2050, ya que tiene la función de reducir el hambre, la pobreza, así como proteger el medio ambiente e impulsar el desarrollo económico, puesto que *“proteger las plantas es proteger la vida”*. Por ello, es de vital importancia sensibilizar sobre la importancia de la protección de la sanidad vegetal en el contexto global (Comisión Europea, 2022). En el caso de México, el Organismo Nacional de Protección Fitosanitaria, el Servicio Nacional de Sanidad Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA) señala *“que es necesario incentivar políticas públicas basadas en criterios técnico-científicos”* (El Economista, 2022).

De acuerdo con Cabello-Montes (2019), la ciencia geoespacial permite la visualización, consulta y descarga de información (modelado de pronósticos), orientado a la sanidad de las plantas, lo cual, se sustenta en una infraestructura de datos espaciales (IDE) respaldada en: información geográfica, metadatos, políticas y normalización (fitosanitaria, agronómicas, epidemiológicas, biológica y espacial), así como un proceso de priorización de plagas y enfermedades agrícolas prioritarias para la región de interés. Según Heit *et al.* (2013), este tipo de enfoque se puede concebir como una metodología en la planificación de actividades de prevención y vigilancia fitosanitaria para evaluar la capacidad de invasión de especies plaga o exóticas.

El modelado de riesgo fitosanitario posibilita tomar decisiones estratégicas ante emergencias fitosanitarias (Heit *et al.*, 2013). Según Vanoye (2014), este tipo de enfoque permite lograr un mejor entendimiento de plagas agrícolas a una escala regional, enfatizando en las actividades de monitoreo y control, incluso en los procesos de vigilancia epidemiológica fitosanitaria, detonando, un enfoque preventivo en el establecimiento de acciones fitosanitarias (Maldonado-Zamora *et al.*, 2017), ya que identificar de forma anticipada las áreas expuestas a la posible introducción establecimiento de especies u organismos plaga es un componente fundamental en los procesos de invasiones biológicas (Januario y Silva, 2021).

En este sentido, el principal riesgo fitosanitario ante la supuesta introducción de una plaga o un patógeno se visualiza cuando el organismo es considerado como una especie no nativa de la región, ya que como proviene de otros lugares, no cuenta con enemigos naturales que limiten su expansión en el nuevo territorio, y además existe la posibilidad que encuentre condiciones de confort favorables para su establecimiento, posible multiplicación y posterior dispersión hacia áreas de producción de cultivos o zonas de traspatio en la nueva región destino.

Por ello, la presente investigación desarrolla el componente de epidemiología espacial mediante la estimación de escenarios de riesgo a escala regional para algunas plagas y enfermedades de interés cuarentenario, económico o exótico para México. Esto permitió obtener la definición o caracterización de áreas en riesgo sanitario con un sustento espacial, epidemiológico, estadístico y agronómico.

Para el caso de México, en materia preventiva, existe el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria, que tiene por objetivo garantizar a nivel nacional la sanidad e inocuidad de los productos de origen animal y vegetal en beneficio de la sociedad a través de la regulación, administración y fomento de la sanidad, inocuidad y calidad agroalimentaria reduciendo los riesgos inherentes en materia agropecuaria bajo un marco jurídico que procura la seguridad sanitaria y la facilitación del comercio en una escala nacional e internacional (SENASICA, 2017).

A nivel mundial existen normativas internacionales donde se establecen prioridades para prevenir la diseminación de plagas o limitar su entrada en productos básicos importados y otros artículos reglamentados (CIPF-NIMF No. 20. 2005). De acuerdo con el OIRSA (2014), el proceso de protección y salvaguarda de cultivos se hace más complejo a raíz del incremento de flujos comerciales y la variedad de sus orígenes, la modalidad de trasportes de mercancías y el aumento de movilidad de personas.

Las pérdidas de cosechas y los altos costos que implica el combate de plagas exóticas, traen afectaciones directas a la producción de alimentos, fibras y forrajes, Incluso de acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), las plagas y enfermedades agrícolas son responsables de la reducción de los rendimientos de cultivos mundiales con afectaciones de entre el 20 y 40 % (FAO. 2016).

En la historia de la humanidad, se han presentado múltiples casos de grandes crisis económicas y sociales como consecuencia de la aparición y expansión de plagas y enfermedades. Desde las plagas bíblicas, como la langosta del desierto (*Schitocerca gregaria*), pasando por hambrunas provocadas por el tizón tardío de la papa (*Phytophthora infestas*) en Irlanda (1845-1849) y recientemente daños económicos propiciados por las moscas de la fruta de los géneros (*Anastrepha* y *Ceratitis*) que en México y América Central han producido daños estimados de hasta 700 millones de dólares por año (OIRSA, 2014).

Históricamente, han existido medios para la diseminación de plagas o patógenos con el potencial de ocasionar daños al patrimonio agropecuario, forestal o humano, e inclusive atribuidos al riesgo antrópico como derivado de los procesos movilidad de personas por turismo y migración. Como el caso de la palomilla del nopal (*Catoblastis cactorum*) que a través de plantas de ornato que ingresaron a Pensacola Florida, en Estados Unidos en el año 2000 (Zimmermann *et al.*, 2007). Además, se encuentra el riesgo de dispersión natural, ya que eventos climáticos extremos como huracanes o tormentas tropicales, han jugado un papel importante en la diseminación de patógenos a largas distancias, por ejemplo, la Cochinilla rosada del hibisco (*Macanellicoccus hirsutus*), la cual se ha dispersado a la mayoría de las Islas Antillanas del Caribe alcanzando la porción norte de América del Sur en Guyana (Neira y Cárdenas *et al.*, 1999).

De acuerdo con el Fondo Monetario Internacional (FMI)¹, la globalización es un proceso resultado de la innovación humana y el progreso tecnológico, integra territorialmente a las economías de todo el mundo a través del comercio y los flujos mercantiles. Aunque también hace alusión al desplazamiento de personas y la transferencia de conocimientos a través de fronteras internacionales, abarcando aspectos culturales, políticos y ambientales.

A escala global, la diseminación de patógenos o agentes plaga pone el riesgo el patrimonio agropecuario de las diferentes regiones del mundo. Por lo que la OMC² a través de las medidas sanitarias y fitosanitarias propone valorarlos mediante el uso de inteligencia geoespacial, que integra los principios geográficos con un soporte epidemiológico y un sustento legal en la normativa internacional y nacional. Entre los elementos que se consideran en la inteligencia geoespacial se involucran los testimonios científicos de presencia/ausencia oficial de plagas, la prevalencia de plagas o enfermedades cuarentenarias, la existencia de zonas libres de plagas o enfermedades, las condiciones ecológicas y ambientales pertinentes, etc. y por supuesto sin dejar de lado los factores antrópicos y/o geofísicos que pueden favorecer la dispersión de las mismas.

De esta forma, la introducción o invasión realizada por organismos vivos que incluyen vertebrados, plantas o insectos considerados exóticos son fenómenos recurrentes en todo el mundo, donde al menos el 1% de las especies que se introducen en nuevo entorno se convertirán en plagas perjudiciales con afectaciones económicas y/o ambientales (Schneider *et al.*, 2022).

También, es de gran relevancia, señalar que el componente humano o antrópico juega un papel importante en la dispersión de plagas y enfermedades. En los últimos 100 años, una cada vez mayor variedad de especies, han sido transportadas a nuevos ámbitos geográficos (Hulme, 2021).

De manera general y de acuerdo con fuentes oficiales, existen reportes de detecciones de plagas de interés cuarentenario avalados por el SENASICA (2015), publicados en el sitio oficial de la Organización Norteamericana de Protección a las Plantas “NAPPO”³. Durante los últimos 15 años, se han reportado 28 detecciones en territorio nacional, de las cuales se han identificado 16 diferentes patógenos y taxonómicamente se agrupan en 5 grupos. Estos organismos incluyen seis insectos, cinco hongos, dos ácaros, dos bacterias y un virus (Cuadro 1.1).

Hipótesis

El comportamiento de la distribución espacial del riesgo de plagas agrícolas de interés cuarentenario y/o económico puede ser modelado mediante técnicas de inteligencia geoespacial considerando el factor antrópico y geofísico como una herramienta de apoyo para las actividades de la Sanidad Vegetal en México.

¹ El FMI es una organización integrada por 184 países que trabaja para promover la cooperación monetaria mundial, asegurar la estabilidad financiera, facilitar el comercio internacional, un alto nivel de empleo, un crecimiento económico sustentable, así como reducir la pobreza.

² La Organización Mundial del Comercio (OMC) se ocupa de las normas mundiales por las que se rige el comercio entre las naciones. Su principal función es velar para que el comercio se realice de la manera más fluida, previsible y libre posible.

³ La Organización Norteamericana de Protección a las Plantas (NAPPO) es una Organización Regional de Protección Fitosanitaria creada conforme al Artículo VIII de la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria (CIPF), de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).

Cuadro 1.1. Detecciones de plagas y enfermedades en México 2000-2015.

INSECTOS			
	Nombre científico	Nombre común	Fecha de notificación
1	<i>Grapholita molesta</i>	Palomilla Oriental de la Fruta	Abril de 2013
2	<i>Drosophila suzukii</i> Matsulara	Mosca del vinagre de alas manchadas	Noviembre de 2011
3	<i>Cactoblastis cactorum</i>	Palomilla del nopal	Agosto de 2006 y Abril de 2009
4	<i>Macrinelliococcus hirsutus</i> Green	Cochinilla rosada del hibisco	Octubre de 2008
5	<i>Diaphorina citry</i> Kuwayama	Psílido asiático de los cítricos (infectivo)	Junio de 2008
6	<i>Ceratitis capitata</i> (Wied)	Mosca del Mediterráneo	Diciembre de 2004 y Junio de 2005
HONGOS			
	Nombre científico	Nombre común	Fecha de notificación
7	<i>Phokopsora pachyrhizi</i>	Roya asiática dela soya	Febrero de 2006 y Enero de 2008
8	<i>Puccinia kuenii</i>	Roya anaranjada de la caña de azúcar	Abril de 2010
9	<i>Moniliphthora rorei</i>	Moniliasis del cacao	Febrero de 2009
10	<i>Olivea tectonae</i>	Roya de la teca	Junio de 2005
11	<i>Uromyces transversalis</i>	Roya del Gladiolo	Enero de 2005
ÁCAROS			
	Nombre científico	Nombre común	Fecha de notificación
12	<i>Raoiella indica</i>	Acaro rojo de las palmas	Noviembre de 2010 y Julio de 2012
13	<i>Steneotarsonemus spinki</i> Smiley	Acaro del vaneo del arroz	Diciembre de 2007 y Febrero de 2009
BACTERIAS			
	Nombre científico	Nombre común	Fecha de notificación
14	<i>Candidatus liberibacter</i> Asiaticus	Huanglongbing (vegetal)	Diciembre de 2009
15	<i>Xylela fastidiosa</i>	Enfermedad de Pierce	Enero de 2009
VIRUS			
	Nombre científico	Nombre común	Fecha de notificación
16	<i>Leprosis citrus</i>	Leprosis de los cítricos	Julio de 2005

Fuente: Phytosanitary Alert System. North American Plant Protection Organization's NAPPO; 2015.

Objetivos

Objetivo general

Estimar el riesgo fitosanitario de plagas y enfermedades de interés cuarentenario y/o económico, ausentes en México (Escenario 2019-2020), a través de modelos cartográficos de riesgo fitosanitario de introducción, establecimiento y dispersión con un sustento transdisciplinario con la finalidad de fortalecer la toma de decisiones en materia de prevención y vigilancia epidemiológica fitosanitaria.

Objetivos particulares

- Describir las estrategias empleadas en la toma de decisiones por los Organismos Regionales de Protección Fitosanitaria a nivel global.
- Analizar las amenazas cuarentenarias existentes de la citricultura mexicana a nivel global.
- Describir las principales amenazas cuarentenarias de las musáceas a nivel global.

- Caracterizar los patrones espaciales de riesgo fitosanitario de *Fusarium oxysporum*, f. sp. *cubense* raza 4 tropical (RF_FocR4T), a escala global con énfasis en América pantropical.
- Caracterizar los patrones espaciales de riesgo sanitario del avispon gigante asiático en la República Mexicana.
- Caracterizar los patrones espaciales del riesgo fitosanitario asociado al cancro de los cítricos en la Planicie Costera del Golfo en territorio mexicano.
- Caracterizar los patrones espaciales del riesgo fitosanitario asociado a *Ceratitis capitata* en el sur de México y Centro América.

Literatura citada

- Cabello-Montes, J.V. (2019). Elaboración de un geoportal web relativo a información fitosanitaria y agronómica de la provincia de Jaén. Consultado: 1 de marzo de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3yiRYs8>
- CIPF-NIMF No. 1. (2006). Principios de cuarentena fitosanitaria en relación con el comercio internacional. Normas Internacionales de Medidas Fitosanitarias. CIPF. Consultado: 16 de abril de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3ycj0S9>
- CIPF-NIMF No. 11. (2004). Análisis de riesgo de plagas para plagas cuarentenarias, incluido el análisis de riesgos ambientales y organismos vivos modificados. Normas Internacionales de Medidas Fitosanitarias. CIPF. Consultado: 8 de mayo de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3P7mQ5X>
- CIPF-NIMF No. 20. (2005). Directrices sobre un sistema fitosanitario de Reglamentación de importaciones. Normas Internacionales de Medidas Fitosanitarias. CIPF. Consultado: 12 de junio de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3IggTkA>
- CONABIO. (2014). *Sistema de información sobre especies invasoras en México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Consultado: 25 de octubre de 2021. Disponible en: <http://www.biodiversidad.gob.mx/invasoras>
- CONACYT. (2015). Raising Geospatial Analysis to GeoIntelligence. Consultado: 10 de febrero de 2018. Disponible en: <http://lagf.org/2014/ppt/Rep%20from%20CenterGeo.pdf>
- DOF. (2009). Diario Oficial de la Federación. Acuerdo en el que se declara erradicado el brote de Palomilla del Nopal (*Cactoblastis cactorum* Berg.) en Isla Contoy, municipio de Isla Mujeres, estado de Quintana Roo. Consultado: 9 de mayo de 2015. Disponible en: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5114029&fecha=12/10/2009
- El Economista. (2022). La agricultura mundial pierde 300,000 millones de dólares por plagas y enfermedades en las plantas Consultado: 11 de mayo de 2022. Disponible en: <https://www.eleconomista.com.mx/empresas/La-agricultura-mundial-pierde-300000-millones-de-dolares-por-plagas-y-enfermedades-en-las-plantas-20220511-0081.html>
- FAO. (2016). Una amenaza flotante: los contenedores marítimos propagan plagas y enfermedades. Consultado: 15 de enero de 2022. Disponible en: <https://www.fao.org/news/story/es/item/412721/icode/>
- FAO. (2018). Nuevas resoluciones de la ONU se centran en la sanidad vegetal, la inocuidad alimentaria y las legumbres. Consultado: 1 de febrero de 2022. Disponible en: <https://www.fao.org/news/story/es/item/1175494/icode/>

- Heit, G., Sione, W., Aceñolaza, P., Zamboni, L., Blanco, P., Horak, P., Cortese, P. (2013). Modelo de distribución potencial de *Lobesia botrana* (Lepidoptera: Tortricidae). Una herramienta de planificación para su detección temprana a nivel regional. *GeoFocus*. 13(2):179–194.
- Hulme, P.E. (2021). Unwelcome exchange: International trade as a direct and indirect driver of biological invasions worldwide. *One Earth*. 4(5):666–679.
- IPS. (2016). Las plagas y enfermedades también viajan en barco. Inter Press Service. Consultado: 10 de febrero de 2022. Disponible en: <https://ipsnoticias.net/2016/08/las-plagas-y-enfermedades-tambien-viajan-en-barco/>
- Januario, M.S. y Silva, P.C. (2021). Modelos de distribución como predictores de invasión de nuevas plagas. (Capítulo 9). In: Estay, S.A (Ed.) *Bases Ecológicas para el Manejo de Plagas*. Ediciones de la Universidad Católica de Chile. ISBN: 978-956-14-2834-8
- LFSV. (2011). Ley Federal de Sanidad Vegetal. Nueva Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 5 de enero de 1994. Última reforma publicada en el DOF 16-11-2011. Consultado 9 de mayo de 2019. Disponible en: <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/117.pdf>
- Maldonado-Zamora, F.I., Ramírez-Dávila, J.F., Lara-Díaz, A.V., Rivera-Martínez, R., Acosta-Guadarrama, A.D., Figueroa-Figueroa, D.K., Rubí-Arriaga, M. and Tapia-Rodríguez, A. (2017). Estabilidad Espacial y Temporal de la Distribución de Trips 1 en el Cultivo de Aguacate en el Estado de México. *Southwestern Entomologist*. 42(2):447–462.
- NAPPO. (2009). Criterios para las listas de plagas en las NRMF's de la NAPPO. Documento de decisión del Comité Ejecutivo de la NAPPO. Consultado: 1 de junio de 2015. Disponible en: <https://bit.ly/3Idisje>
- OIRSA. (2014). El OIRSA, un organismo internacional en apoyo a sus estados miembros. Naturaleza, Propósitos y Mecanismos de Apoyo. Gerencia Operativa Interna, marzo 2014.
- OIRSA. (2015). Organismo Internacional Regional de Sanidad Agropecuaria. Plan Estratégico 2015-2025. Consultado: 15 de febrero de 2019. Disponible en: <https://www.oirsa.org/contenido/documentos/plan-15-25.pdf>
- ONU. (2020). El Año Internacional de la Sanidad Vegetal: la oportunidad de combatir las plagas del cambio climático. <https://bit.ly/3Ii2tkg>
- Orchardson, E. (2019). Más vale prevenir que lamentar. Amos Alakonya habla sobre plagas, procedimientos y por qué todos deberían preocuparse por la sanidad de las semillas. Consultado: 15 de febrero de 2019. Disponible en: <https://bit.ly/3bEw7UI>
- SENASICA. (2017). Manual de Organización del Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. Septiembre de 2017. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Consultado: 1 de junio de 2018. Disponible en: <https://www.gob.mx/senasica/documentos/manual-de-organizacion-50509>.
- SENASICA. (2015). Prioridades estratégicas del SENASICA. 2015. Consultado el 1 de junio de 2015 y disponible en el siguiente sitio: <http://www.senasica.gob.mx/?id=1161>
- SIAP. (2022). 12 de mayo, proteger las plantas para proteger la vida. Consultado: 15 de mayo de 2022. Disponible en: <https://www.gob.mx/siap/articulos/siete-datos-que-debes-saber-para-sumarte-al-dia-internacional-de-la-sanidad-vegetal>
- Schneider, L., Rebetez, M. and Rasmann, S. (2022). The effect of climate change on invasive crop pests across biomes. *Current Opinion in Insect Science*. 50:100895.

- Vanoye, E.V. (2014). La variación espacial en plagas agrícolas como componente fundamental en su control y manejo. *TecnoINTELECTO*. 11(2): 7–14.
- Zimmermann, H., Bloem, S. y Klein, H. (2007). *Cactoblastis cactorum*. Biología, historia, amenaza, monitoreo y control de la palomilla del nopal. FAO. Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). Viena, Austria. Consultado: 1 de agosto de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3Ak8xGW>

CAPÍTULO 1. CULTIVOS SANOS, MESAS LLENAS: EL ENFOQUE GEOESPACIAL DE LA PROTECCIÓN VEGETAL EN LOS ORGANISMOS REGIONALES DE PROTECCIÓN FITOSANITARIA⁴

Resumen

El trasiego de frutas, hortalizas y semillas en cualquier país tiene implicaciones legales reglamentarias que se ponen de manifiesto en las medidas sanitarias y fitosanitarias (MSP). Las Organizaciones Regionales de Protección Fitosanitaria (ORPF) actúan para garantizar la sanidad, inocuidad y la calidad agroalimentaria. Las estrategias y los mecanismos de actuación deben anticiparse a los riesgos fitosanitarios (RF) para poder aplicar medidas preventivas. Este capítulo describe las estrategias geotecnológicas enfocadas a salvaguardar la protección vegetal de cada ORPF, incorporando implícitamente un enfoque transdisciplinario en materia de sanidad vegetal.

Palabras clave: Sanidad vegetal, riesgo fitosanitario, análisis espacial.

Abstract

Harvesting fruits, vegetables and seeds to any country has legal and regulatory implications that are evident in sanitary and phytosanitary measures (SPS). Regional Plant Protection Organizations (RPPO's) act to ensure agri-food health, safety and quality. Strategies and action mechanisms must anticipate phytosanitary risks (PR) in order to implement preventive measures. This document describes the geo-technological strategies focused on safeguarding plant protection for each RPPO, implicitly incorporating a transdisciplinary approach to plant health.

Keywords: Plant health, phytosanitary risk, spatial analysis.

1.1. Introducción

Las plantas son primordiales para vida, de ellas se obtiene el 80% de la alimentación mundial y producen el 98% del oxígeno vital para el ser humano (FAO, 2021a). Sin embargo, existe una gran diversidad de organismos plaga/patógenos que amenazan su integridad *i.e.*, ácaros, bacterias, hongos, insectos, malezas, nemátodos o virus. Un precepto fundamental en la protección fitosanitaria es que «*Dado que las plagas también viajan, los problemas fitosanitarios de cada país deben considerarse como si fueran comunes a todos*» “Scaramuzza Pandini” (Fernández-Moriño, 2002).

De acuerdo con Nboyine *et al.* (2019), cultivos alimentarios pueden presentar afectaciones entre 20% y 40% por daños asociados a plagas y enfermedades. De manera global, los RF se evalúan por el análisis de riesgo de plagas (ARP), definido como un proceso de valoración basado en evidencias biológicas, científicas y económicas para determinar el nivel de riesgo que representan, ya sea en, «*un país, parte de un país, países completos o partes de diversos países*» (NIMF 5, 2018).

A finales del siglo XIX, se establecieron los acuerdos legales para la aplicación de MSF, como un compromiso formal por parte de los países miembros, cuyo propósito fue mantener un

⁴ ARTÍCULO DE DIVULGACIÓN PREPARADO como: Ibarra-Zapata, E., Aguirre-Salado, C.A. y Mora-Aguilera, G. Cultivos sanos, mesas llenas: el enfoque geoespacial de la protección vegetal en los organismos regionales de protección fitosanitaria, PARA SOMETERSE A ARBITRAJE.

acceso seguro a los mercados internacionales de productos vegetales, bajo el precepto esencial de mantener una adecuada salud de las plantas.

La aplicación y desarrollo de la ciencia geoespacial, se ha diversificado de manera importante como una disciplina que apoya con diferentes metodologías para resolver problemas actuales. El contexto espacial aplicado a RF, ha permitido el análisis de múltiples conjuntos de datos, a través de la modelación mediante técnicas descriptivas, de inferencia y de optimización, para fortalecer la toma de decisiones (Abou-Shaara, 2019).

El objetivo del presente trabajo es describir las estrategias empleadas en la toma de decisiones por los ORPF en las MSF, dando soporte en el pronóstico de escenarios de riesgo de plagas y enfermedades en materia de sanidad vegetal (Rega *et al.*, 2018; Boulet *et al.*, 2019).

1.2 El contexto global de la protección fitosanitaria

La Convención Internacional de Protección Fitosanitaria (CIPF) es un tratado intergubernamental firmado por 180 países (Figura 1.1), con el objetivo de proteger los recursos vegetales del mundo de la propagación e introducción de plagas y enfermedades, así como promover un comercio seguro (FAO-IPPC, 2020). Sin embargo, derivado de los procesos globales es pertinente incluir métodos y técnicas que permitan fortalecer en la toma de decisiones sustentadas en enfoques innovadores como “*One Health*”.

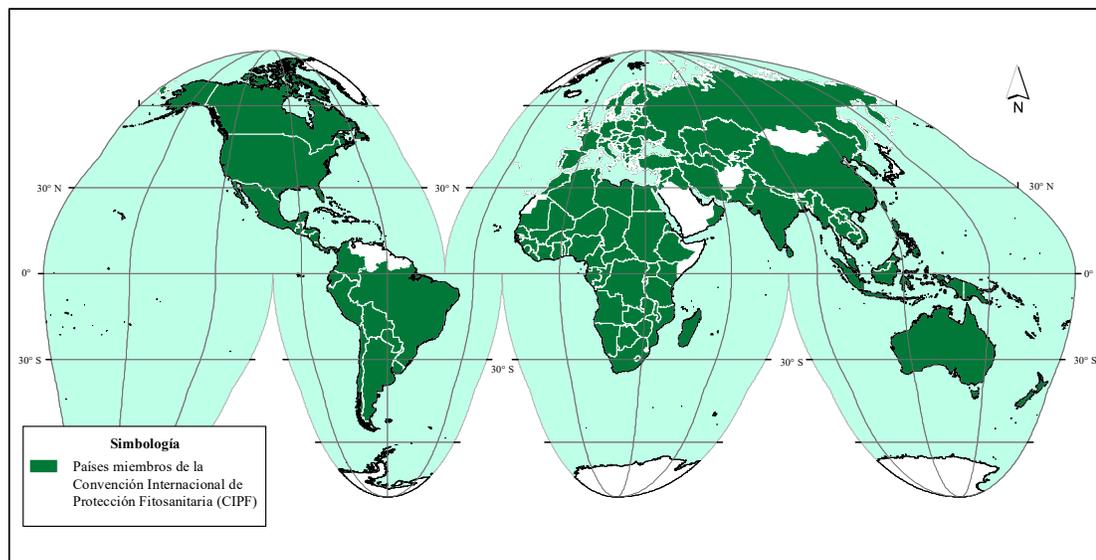


Figura 1.1. Países miembros de la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria.

1.3 El papel de los ORPF en la estimación de escenarios de riesgo de plagas y enfermedades agrícolas

La estructura funcional de la protección fitosanitaria se integra por las ORPF que tienen la función de órgano de coordinación de los países miembros a una escala regional, varios países. Ellos utilizan enfoques intersectoriales e inclusivos que posibilitan una adecuada salud de las plantas con beneficios colaterales al ambiente, salud animal y salud pública (Figura 1.2).

1.3.1. Comisión de Protección Fitosanitaria de Asia y el Pacífico (APPPC)

Mantiene un acuerdo de protección fitosanitaria que se encarga de examinar la situación de riesgo mediante la coordinación y promoción de sistemas de protección conforme las MSF, fortalece sus capacidades preventivas en diferentes etapas: gestión, planificación, coordinación y ejecución. La toma de decisiones involucra análisis estadísticos, mapeo de amenazas y aplicación de inteligencia con la finalidad de lograr delimitar áreas libres de plagas (Yongfan, 2017). Sin embargo, es factible integrar geotecnologías en la gestión de desastres agrícolas (Kaku y Held, 2013), debido a que posibilita fortalecer las acciones de monitoreo y vigilancia en los países que integran la región (Figura 1.2a).

1.3.2. Comunidad Andina (CAN)

Esta organización busca fortalecer y mejorar la sanidad vegetal entre los países miembros, facilitando el comercio internacional evitando el ingreso de plagas que representen una amenaza para la agricultura (FAO, 2021b) (Figura 1.2b). Se respalda en el *Sistema Andino de Sanidad Agropecuaria* (SASA), que establece los criterios de protección fitosanitaria para facilitar el comercio de plantas y productos vegetales. La toma de decisiones se sustenta en el uso de las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC's) y en la gestión del riesgo de desastres con énfasis en el componente ambiental, y una de sus estrategias incluye el impulsar el uso de geotecnologías para fortalecer el monitoreo de nuevos RF en la región (Vargas, 2012).

1.3.3. Comité de Sanidad Vegetal del Sur (COSAVE)

Su estrategia preventiva se respalda en el *Programa de Inteligencia Fitosanitaria Prospectiva* en materia de RF, cambio climático y seguridad alimentaria (Galliani, 2018). Concentra, integra y analiza información, favoreciendo la toma de decisiones con la implementación del sistema de alerta de plagas a través del análisis situacional, utiliza un sistema de priorización de plagas basado en la metodología de análisis (SIG), bases de datos y análisis estadístico, lo que da soporte a un sistema de vigilancia óptimo (COSAVE-SIDF-IICA, 2018). La protección fitosanitaria se realiza mediante el sistema integrado de medidas para mitigación del riesgo de plagas, en el que se establecen los requisitos y procedimientos para facilitar el movimiento de productos vegetales libres de plaga.

1.3.4. Organización de Protección Vegetal del Cercano Oriente (NEPPO)

Su estrategia de prevención se respalda en modelos y herramientas de mapeo de riesgo de plagas a partir de los SIG (Kroschel *et al.*, 2014). Se direcciona sobre diferentes ejes para asegurar una acción eficaz ante RF y facilitar el intercambio comercial. El modelado geoespacial se basa en *Insect Life Cycle Modeling* (ILCYM), que evalúa el impacto del cambio climático sobre RF futuros. Es una herramienta (SIG-Web) para la gestión de datos y la elaboración de cartografía de riesgos (Tonnang *et al.*, 2017). Se integra por los módulos de: 1) creación de modelos, 2) validación y simulación y 3) la distribución potencial, con aplicabilidad en los países que integran la región (Figura 1.2d).

1.3.5. Organización Europea y Mediterránea de Protección Fitosanitaria (EPPO)

El riesgo de plagas se basa en una interfaz web que integra el conocimiento científico, el proceso de ARP y el juicio de experto (Burnel *et al.*, 2013). Integra el componente geoespacial mediante el mapeo de riesgos por aptitud climática (Kriticos *et al.*, 2012), la evaluación de impactos (económicos, ambientales y sociales), el mapeo de movilidad, bajo un enfoque de sistemas orientado a emergencias fitosanitarias. Emplean el programa informático *CAPRA* que permite ayudar a los analistas de riesgo de plagas a ejecutar el esquema de apoyo a la toma de

decisiones y con ello generar recomendaciones a los países miembros (Figura 1.2e). Esta organización respalda sus iniciativas, a través del Grupo de Trabajo Internacional de Mapeo de Riesgos de Plagas (Venette *et al.*, 2010).

1.3.6. Consejo Fitosanitario Interafricano (IAPSC)

La toma de decisiones se basa en el *Sistema de Manejo de Información de Plagas* (PIMS), que da soporte en la elaboración de estrategias en beneficio de la salud de las plantas (Cameron *et al.*, 2018). Su fundamento metodológico se basa en evidencia sobre inocuidad alimentaria e integra la regulación, monitoreo de los alimentos y la evaluación de riesgos (Godefroy *et al.*, 2019). Utiliza las TIC's como apoyo en el manejo de plagas en la extensión territorial de la región (Figura 1.2f). Las acciones fitosanitarias se llevan a cabo mediante la promoción de estrategias adecuadas, con una protección general sobre plantas naturales y cultivables basada en evidencias científicas.

1.3.7. Organización Norteamericana de Protección de las Plantas (NAPPO)

Esta organización promueve enfoques fitosanitarios coordinados a través de la colaboración entre sus países miembros (Figura 1.2g) mediante el fortalecimiento del comercio de plantas y productos vegetales, basado en armonizar y elaborar normas regionales en pro de la sanidad vegetal (Zlotina, 2015). Sus esfuerzos se orientan a la detección y seguimiento oportuno de plagas, mediante el *Phytosanitary Alert System* (PAS) que proporciona alertas tempranas y notificaciones sobre la situación que mantienen los RF en la región, lo que fortalece las medidas de inclusión y detección ante posibles invasiones de plagas (Magarey *et al.*, 2009).

1.3.8. Organismo Internacional Regional de Sanidad Agropecuaria (OIRSA)

La plataforma *Programa Regional de Variables Climáticas y Sanidad Agropecuaria* (PRVCyS) permite fortalecer la toma de decisiones relacionadas con la prevención, manejo y adaptación a plagas y enfermedades asociadas al componente ambiental. Su enfoque se centra en la prevención y mitigación del riesgo, proporcionando información estratégica para los países miembros (Figura 1.2h). El sistema permite optimizar las acciones agro-sanitarias y se utiliza como herramienta de apoyo en la toma de decisiones que permiten coadyuvar en el pronóstico climático, delimitación de áreas de riesgo, recomendaciones de manejo, comunicación del riesgo, cooperación y gestión (OIRSA, 2017).

1.3.9. Organización de Protección Fitosanitaria para el Pacífico (PPPO)

Su estrategia de prevención se sustenta en: 1) mantener, desarrollar y aplicar medidas sanitarias y fitosanitarias, 2) gestionar la cooperación regional, 3) facilitar el flujo de información, y 4) colaborar en asuntos fitosanitarios, con aplicabilidad en los países miembros (Figura 1.2i). Sus acciones se soportan en una plataforma informática basada en una infraestructura de datos, que posibilita mejorar la gestión de información y con ello, fomentar la toma oportuna de decisiones en materia de RF (SPC, 2020a). Técnicamente, el manejo de RF se basa en la implementación de soluciones que permitan superar los desafíos que supone el comercio internacional respaldado en tres elementos: datos, ciencia aplicada y soluciones técnico-científicas (SPC, 2020b).

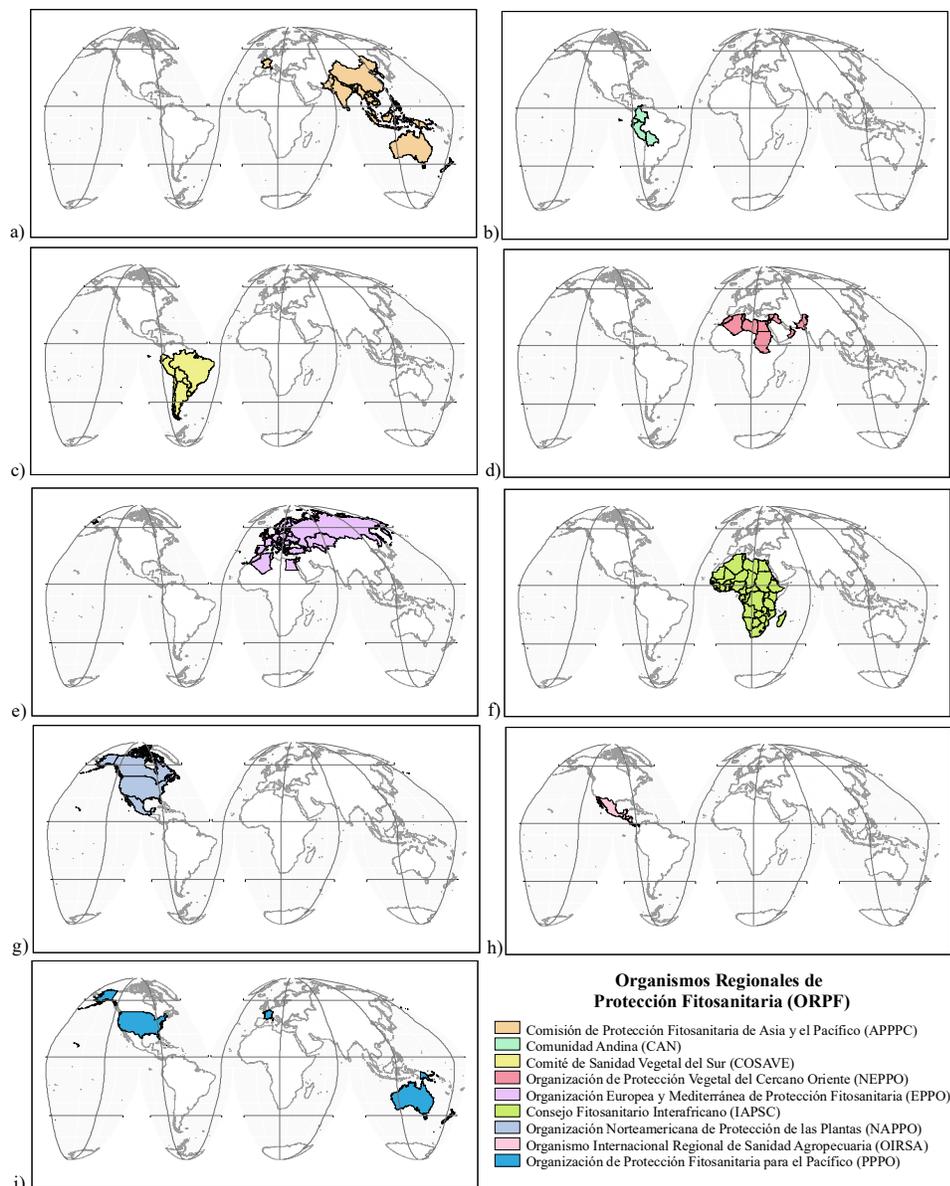


Figura 1.2. Organismos Regionales de Protección Fitosanitaria: a) APPPC, b) CAN, c) COSAVE, d) NEPPO, e) EPPO, f) IAPSC, g) NAPPO, h) OIRSA, i) PPPO.

1.4. Conclusiones

Los ORPF están encargados de evitar la propagación de plagas y enfermedades agrícolas a nivel global, asegurando que los agroalimentos se encuentren sanos y sean inocuos para que no afecten a los vegetales cultivables y silvestres. Para ello, se apoya en el uso de infraestructuras de datos espaciales, en diferentes escalas y niveles de decisión. Cada fruto, verdura o semilla que llega a la mesa de cada hogar, ha sido exhaustivamente salvaguardado por personal especializado e instituciones que han logrado respaldar la calidad alimentaria conforme las medidas sanitarias y fitosanitarias. La tecnología geoespacial permite coadyuvar en la planeación y operatividad de los

sistemas de monitoreo y vigilancia de riesgo fitosanitario en todas las regiones geográficas del planeta.

Los desarrollos geotecnológicos aplicados a la salud de las plantas se orientan desde el almacenamiento, geocodificación y manejo de datos espaciales hasta la creación de simulaciones, modelación y el uso de plataformas web o informáticas, basados en la integración de tipo transdisciplinario, generalmente en cuatro etapas: 1) la elaboración de modelos con simulaciones económicas, ambientales o sociales, 2) la validación de los mismos, 3) su implementación en situaciones reales y 4) la comunicación del riesgo.

La integración de las TIC's con las herramientas geotecnológicas permite fortalecer y agilizar el proceso de evaluación del riesgo de plagas. Esto permite afinar las medidas de vigilancia contra los organismos patogénicos, para evitar que ingresen a nuevas regiones, poniendo en peligro los cultivos sanos, y con ello la seguridad alimentaria en el mundo.

1.5. Literatura citada

- Abou-Shaara, F.H. (2019). Geographical Information System for Beekeeping Development. *Journal of Apicultural Science*. 63:5–16.
- Cameron, K., Richards, G., Oronje, M., Day, R. (2018). New tools for pest risk analysis. Centre for Agriculture and Biosciences International. *CABI*. Consultado: 3 de marzo de 2019. Disponible en: <https://www.cabi.org/publishing-products/pest-risk-analysis-tool/>
- COSAVE-SIDF-IICA. (2018). Guía para la implementación del sistema de vigilancia fitosanitaria específica. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, Comité Regional de Sanidad Vegetal del Cono Sur. Consultado: 3 de marzo de 2019. Disponible en: <https://repositorio.iica.int/handle/11324/7907>
- FAO. (2021a). La FAO presenta 2020 como Año Internacional de la Sanidad Vegetal. Consultado: 3 de marzo de 2019. Disponible en: <http://www.fao.org/news/story/es/item/1253562/icode/>
- FAO. (2021b). Decisión No. 515 - Sistema Andino de Sanidad Agropecuaria. Consultado: 3 de marzo de 2019. Disponible en: <http://www.fao.org/faolex/results/details/es/c/LEX-FAOC060445/>
- FAO-IPPC. (2020). Organizaciones Regionales de Protección Fitosanitaria. Consultado: 7 de agosto de 2019. Disponible en: <https://www.ippc.int/es/external-cooperation/regional-plant-protection-organizations/>
- Fernández-Mariño, N. (2002). Scaramuzza Pandini: una personalidad en la historia de la sanidad vegetal. *Fitosanidad*. 6(2):51–61.
- Galliani, E. (2018). Actividades COSAVE. Taller Regional CIPF América Latina. Consultado: 13 de octubre de 2019. Disponible en: https://www.ippc.int/static/media/files/publication/es/2018/10/7.2.2_COSAVE.pdf
- Godefroy, S.B., Al-Arfaj, R.A., Tabarani, A and Mansour, H. (2019). Investments in food safety risk assessment and risk analysis as a requirement for robust food control systems: Calling for Regional Centres of Expertise. *Food and Drug Regulatory Science Journal*. 2(1). <https://bit.ly/3yF76BO>
- Kaku, K. and Held, A. (2013). Sentinel Asia: A space-based disaster management support system in the Asia-Pacific region. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 6:1–17.

- Kriticos, D.J., Webber, B.L., Leriche, A., Ota, N., Macadam, I., Bathols, J. and Scott, JK. (2012). CliMond: global high-resolution historical and future scenario climate surfaces for bioclimatic modelling. *Methods in Ecology and Evolution*. 3:53–64.
- Kroschel J., Mujica N., Carhuapoma P., Juarez H., Okonya J., Le Ru B., and Hanna R. (2014). Adaptation to Pest Risks under future Climates in Africa. Consultado: 3 de marzo de 2019. Disponible en: www.rtb.cgiar.org
- Magarey, R.D., Colunga-Garcia, M. and Fiesemann, D.A. (2009). Plant Biosecurity in the United States: Roles, Responsibilities, and Information Needs. *BioScience*. 59(10):875–884.
- Nboyine, J.A., Kusi, F., Abudulai, M. and Benjamin, BK. (2019). A new pest, *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith), in tropical Africa: Its seasonal dynamics and damage in maize fields in northern Ghana. *Crop Protection*. 127:104960.
- NIMF 5. (2018). Glosario de términos fitosanitarios. FAO – IPPC. Consultado: 13 de octubre de 2019. Disponible en: <https://bit.ly/3NybGpy>
- OIRSA. (2017). Organismo Internacional Regional de Sanidad Agropecuaria Programa Regional de Variables Climáticas y Sanidad Agropecuaria. Consultado: 6 de marzo de 2020. Disponible en: <https://bit.ly/3AqYfVp>
- Rega, C., Bartual, A.M., Bocci, G., Sutter, L., Albrecht, M., Moonen, A.C., Jeanneret, P., van der Werf, W., fister, S.J., Hollan, J.F. and Paracchinia, M.S. (2018). A pan-European model of landscape potential to support natural pest control services. *Ecological Indicators*. 90:653–664.
- SPC. (2020a). Centro de datos del Pacífico (PDH). Consultado: 12 de abril de 2021. Disponible en: <https://www.spc.int/pacific-data-hub-pdh>
- SPC. (2020b). División de Geociencias, Energía y Marítimo (GEM). Consultado: 12 de julio de 2021. Disponible en: <https://gem.spc.int/>
- Tonnang, Z.E.H., Hervé, B.D.B., Biber-Freudenberger, L., Salifu, D., Subramanian, S., Ngowi, B.V., Guimapi AYR., Anani, B., Kakmeni, M.M.F., Affognon, H., (...) Borgemeister, C. (2017). Advances in crop insect modelling methods-Towards a whole system approach. *Ecological Modelling*, 354:88–103.
- Vargas R.D. (2012) Sistemas de información ambiental en la Comunidad Andina: una breve reseña. Consultado: 6 de marzo de 2020. Disponible en: <https://bit.ly/3Raxzym>
- Venette, R.C., Kriticos, D.J., Magarey, R.D., Koch, F.H., Baker, R.H., Worner, S.P., Gomez Raboteaux, N.N., McKenney, D.W., Dobesberger, E.J., Yemshanov, D., (...) Pedlar, J. (2010) Pest risk maps for invasive alien species: a roadmap for improvement. *BioScience*. 60:349–362.
- Yongfan, P. (2017). Asia-Pacific Plant Protection Commission (APPPC) Update 29. Consultado: 6 de marzo de 2020. Disponible en: <https://bit.ly/3a8LnZw>
- Zlotina, M. (2015). Evaluation of evidence and its uncertainty in qualitative pest risk assessments: the North American perspective. *Bulletin EPPO*. 45(2):299–303.

CAPÍTULO 2. AMENAZAS CUARENTENARIAS DE LA CITRICULTURA MEXICANA: CANCRO, MANCHA NEGRA, Y CLOROSIS VARIEGADA DE LOS CÍTRICOS⁵

Resumen

A nivel mundial, México se encuentra en 4° lugar en producción cítrica — por debajo de Brasil, China y Estados Unidos. Para el año 2021, los cítricos naranja, limón, toronja y mandarina fueron cultivados en 28 estados de la República Mexicana. Los cítricos se encuentran amenazados por diferentes problemas fitosanitarios que pueden traer afectaciones en la calidad, producción y comercialización de los mismos. El objetivo de este capítulo fue caracterizar el cancro, mancha negra y clorosis variegada de los cítricos desde una perspectiva espacial-epidémica. Los resultados indicaron que existen 122 territorios a nivel global con al menos la presencia de alguna de las amenazas fitosanitarias anteriores. Con ello se lograron definir cuatro regiones consideradas de alto riesgo fitosanitario para los cítricos mexicanos, al identificar la movilidad de productos o subproductos cítricos. En este sentido, el 86% del volumen de cítricos movilizado hacia México proviene de países que mantienen presencia de al menos uno de los tres patógenos. Los resultados de este trabajo permitirán coadyuvar en la definición de estrategias de manejo en términos de comercio internacional ante estas amenazas de interés cuarentenario.

Palabras clave: Cítricos, plaga cuarentenaria, riesgo fitosanitario, México.

Abstract

Worldwide, Mexico ranks 4th in citrus production — below Brazil, China and USA. By 2021, orange, lemon, grapefruit and mandarin citrus were grown in 28 states of Mexico. Citrus are threatened by different phytosanitary problems that can affect their quality, production and marketing. The objective of this chapter was to characterize citrus canker, black spot and variegated chlorosis from a spatial-epidemic perspective. The results indicated that there are 122 territories globally with at least one of the above phytosanitary threats. Four regions considered to be at high phytosanitary risk for Mexican citrus were defined by identifying the mobility of citrus products or by-products. In this sense, 86% of the volume of citrus moved to Mexico comes from countries that maintain the presence of at least one of the three pathogens. The results of this work will contribute to the definition of management strategies in terms of international trade in the face of these quarantine threats.

Keywords: Citrus, quarantine pest, phytosanitary risk, Mexico.

2.1. Introducción

Los cítricos son alimentos ricos en vitamina C, ácido fólico y vitamina A, potasio, antioxidantes y fibra, los cuales permiten fortalecer el sistema inmunológico. De acuerdo con González-Chávez (2013), las aguas frescas y jugos frutales se encuentran entre las principales bebidas que consumen los mexicanos.

⁵ ARTÍCULO DE DIVULGACIÓN PREPARADO como: Ibarra-Zapata, E., Aguirre-Salado, C.A. y Mora-Aguilera, G. Amenazas cuarentenarias de la citricultura mexicana: cancro, mancha negra, y clorosis variegada de los cítricos, PARA SOMETERSE A ARBITRAJE.

La citricultura es una actividad de gran importancia dentro de la fruticultura mexicana (Rinconada *et al.*, 2022; Alia *et al.*, 2011). En 2020, la naranja (*Citrus sinensis*), limón persa (*Citrus latifolia*), limón mexicano (*Citrus aurantifolia*), toronja (*Citrus paradisi*) y mandarina (*Citrus reticulata*) en conjunto, aportaron el 3.27% de la superficie sembrada de la producción agrícola mexicana en la modalidad riego y temporal, y representó el 5.57% del valor de la producción. Los cítricos se cultivan en veintisiete estados a excepción de Ciudad de México, Coahuila, Chihuahua y Tlaxcala (SIAP, 2021), y representan una fuente de ingresos de aproximadamente 67 000 familias (Valencia y Duana, 2019). México ocupa el cuarto lugar mundial en producción de cítricos por detrás de Brasil, China y EUA. El país es el primer productor de limón, el cuarto de naranja y de toronja, y el décimo tercero de mandarina a nivel mundial (Rinconada *et al.*, 2022).

La calidad de los cítricos en general, está asociada al tamaño de la fruta (diámetro), grados Brix (contenido de sacarosa) y apariencia (Pérez y Orozco, 2004). Aunque el clima y el manejo agrícola influyen en la calidad, existen también factores bióticos como los insectos y microorganismos que pueden afectarla. Como todas las plantas cultivadas, los cítricos igualmente poseen una gran cantidad de microorganismos que afectan la producción y calidad.

Con la producción sostenida, los productores y técnicos aprenden a convivir con los problemas fitosanitarios. Sin embargo, también existen organismos exóticos, presentes en otros países productores de cítricos, pero ausentes en el país y que se les considera de interés cuarentenario. Entre estos, destacan tres organismos que causan enfermedades con alto riesgo productivo: *Xanthomonas citri* subsp. *citri*, *Guignardia citricarpa*, y *Xylella fastidiosa* subsp. *pauca*, los cuales causan el Cancro de los Cítricos, Mancha Negra de los Cítricos, y la Clorosis Variegada de los Cítricos, respectivamente. Este tipo de organismos son monitoreados por instancias oficiales fitosanitarias para evitar su ingreso, diseminación y establecimiento, ya que a la fecha se consideran ausentes en México (SENASICA, 2019a; SENASICA, 2019b; SENASICA, 2019c).

Conforme el glosario de términos fitosanitarios estandarizados por la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria (CIPF) adscrita a la FAO, una plaga cuarentenaria se define como una ‘*plaga de importancia económica potencial para el área en peligro, aún cuando la plaga no esté presente o, si está presente, no esté extendida y se encuentre bajo control oficial*’ (NIMF-CIPF 5, 2006). Es decir, es aquella plaga ausente o con distribución restringida. También, de acuerdo a este glosario, una plaga tiene una connotación muy amplia e incluye a los microorganismos e insectos.

En México, la Dirección General de Sanidad Vegetal (SENASICA) realiza la vigilancia activa de plagas cuarentenarias de los cítricos (PCC), por medio de acciones operativas específicas en zonas de probable ingreso o de alto riesgo de introducción, establecimiento y dispersión. Estas acciones son de carácter preventivo y pueden incluir rutas de trampeo, rutas de vigilancia, parcelas/planta centinelas, áreas de exploración y viveros trampa. Estas estrategias son un insumo primordial para toma de decisiones operativas, normativas y en la gestión estratégica de riesgos (SENASICA, 2021).

2.2. Plagas cuarentenarias de los cítricos, un riesgo fitosanitario para la citricultura mexicana

La epidemiología estudia la distribución, frecuencia y factores determinantes de las enfermedades. Según Kranz (1990), en la salud de las plantas aplica al comportamiento de amenazas y RF, es decir, estudia las poblaciones del patógeno en una plantación influenciada por factores ambientales o que se ven influenciados por la intervención del ser humano. De acuerdo

con Mora-Aguilera *et al.* (2008), su finalidad es entender las enfermedades a nivel de población con el propósito de tomar decisiones racionales de manejo y control, apoyándose en el entendimiento de los principios biológicos de las epidemias.

Las PCC “*cancro, mancha y clorosis variegada de los cítricos*” consideradas enfermedades ausentes en México, tienen en común que provocan afectaciones en la parte aérea de las plantas y lesiones en el fruto (Cuadro 2.1). Cabe señalar que este tipo de afectaciones son determinantes en el comercio nacional e internacional. En este sentido, López-Camelo (2003), señala que la apariencia del fruto es la primera impresión que el consumidor recibe y es el componente más importante para la aceptación y su eventual compra.

La apariencia se considera un atributo que define la calidad de los cítricos (El-Otmani *et al.*, 2011). De acuerdo con Vásquez y Jiménez (2012), una mala apariencia es sinónimo de una baja calidad del fruto. Por ello, la posible introducción y establecimiento de las PCC ausentes en México, pueden traer afectaciones importantes asociadas principalmente a una mala apariencia y calidad de los cultivos cítricos en la República Mexicana, siendo un importante impedimento para la comercialización en escala nacional y global (Gottwald, 2000).

Estas tres PCC, tienen en común que pueden afectar de manera directa la productividad cítrica mexicana. Entre 2010 y 2017, se registró una producción con un comportamiento creciente, presentando una tasa media de crecimiento anual de 2.6% (Solleiro y Mejía, 2019), y según *USDA Citrus Annual Mexico* (USDA por sus siglas en inglés), las exportaciones cítricas mexicanas continúan en aumento debido a la demanda internacional (USDA-GAIN, 2020), *i.e.*, particularmente, el cultivo de naranja mexicana aporta alrededor del 8% de la superficie mundial cosechada y el 6% del volumen total mundial (Rivera-López *et al.*, 2020).

Las PCC poseen características biológicas, epidémicas y espaciales únicas que las diferencian entre sí, a pesar que su principal daño se refleja en la apariencia y calidad de frutos infectados, los cuales se presentan en el Cuadro 2.1, que muestra las peculiaridades propias de cada enfermedad.

Cuadro 2.1. Plagas de los cítricos introducidas y establecidas en la citricultura mexicana que fueron sujetas a campañas fitosanitarias o de accionabilidad oficial por su carácter cuarentenario.

Nombre de la plaga/organismo	Tipo	Cítrico que afecta
<i>Candidatus liberibacter asiaticus</i>	Bacteria	Todas
Citrus leprosis virus (N and C) Orchid Fleack virus	Virus	Todos
Citrus tristeza virus Raza T36 y VT	Closterovirus	Todos
<i>Toxoptera citricida</i>	Insecto (Aphididae)	Todos
<i>Diaphorina citri</i>	Insecto (Liviidae)	Todos

Fuente: Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria, (SENASICA, 2022). <https://www.gob.mx/senasica/documentos/plagas-reglamentadas-de-los-citricos-110863>

Cuadro 2.2. Características de plagas cuarentenarias de los cítricos ausentes en México, bajo esquema de vigilancia epidemiológica activa.

	Cancro de los cítricos <i>Xanthomonas citri</i> Subsp. <i>citri</i> .	Mancha negra de los cítricos <i>Guignardia citricarpa</i> Kiely	Clorosis variegada de los cítricos <i>Xylella fastidiosa</i> Subsp. <i>pauca</i> ,
Apariencia del fruto	 Fotografía: Hilda Gómez, USDA. s/a.	 Fotografía: Rybak <i>et al.</i> (2013).	 Fotografía: Purcell s/a. y FUNDECITRUS s/a.
Afectaciones	Provoca defoliación severa, muerte regresiva de las ramas, caída prematura y manchado de frutos (CABI, 2019).	Causa caída prematura de frutos, reduce el rendimiento y el valor comercial de la fruta (Rybak <i>et al.</i> , 2013).	Causa afectaciones en el tamaño de los frutos (reducción), provoca una maduración precoz y un sabor muy ácido por lo que no son aptos para su consumo (Hernández-Macías, 2013).
Medios de dispersión	El viento asociado a lluvia provoca la dispersión de la enfermedad. El minador de la hoja de los cítricos puede incrementar la incidencia y severidad de la enfermedad (SENASICA, 2019a).	Se dispersa a corta distancia por la asociación de viento y lluvia, principalmente por movimiento de material vegetativo infectado (árboles, yemas y varetas (SENASICA, 2019b).	Se puede dispersar a largas distancias a través de material vegetal propagativo contaminado y se disemina por medio de insectos vectores de la familia <i>Cicadellidae</i> (chicharritas) (SENASICA, 2019c).
Cultivos afectados	Los hospedantes más susceptibles son las toronjas y la lima, también las naranjas de ombligo y limones, principalmente los que tienen abundantes espinas y se ha observado que las mandarinas y la naranja valencia son menos susceptibles (Hernández-Macías, 2013).	Todos los cultivares de cítricos son susceptibles, pero, los más afectados son: limones, naranjas valencianas, mandarinas y toronjas (Texas A&M., 2012)	Sus hospedantes pertenecen a 18 familias y 33 géneros, sin embargo, sus principales cultivos de importancia económica son los cítricos, café y olivo (Manceau, 2016 y SENASICA, 2019c).

Fuente: Elaboración propia a partir de las diferentes fichas técnicas y publicaciones científicas, según las referencias señaladas en cada elemento del Cuadro 2.2. s/a: sin año.

2.3. El principio espacial y condición fitosanitaria de las amenazas cuarentenarias de los cítricos mexicanos

La Primera Ley de Tobler (*Tobler's First Law*) señala “*Todas las cosas están relacionadas, pero las cercanas están más relacionadas que las distantes*” (Anselin, 2001). De acuerdo con Celemin, (2020), este principio geográfico no solo enfatiza en las propiedades únicas de los lugares, sino que va más allá, debido a que, al involucrar el territorio, permite conocer mejor los alcances y las limitaciones de la problemática que se analice. La integración del contexto espacial al estudio de la salud de las plantas permite afrontar, analizar y comprender la problemática, ya que los efectos espaciales de las variables analizadas, se basan en la distribución y comportamiento a través del espacio geográfico (Siabato y Guzmán, 2019).

Considerando lo anterior, el estatus cuarentenario de las PCC se utilizó como insumo base en la caracterización del marco geográfico, lo que permitió estimar el grado de asociación entre los RF. Técnicamente, este proceso se basó en el criterio de asociación espacial, definido por las unidades geográficas o de análisis que mantienen relación por su condición fitosanitaria, mediante el criterio de proximidad (Miller, 2004). Para ello, se empleó el límite administrativo de México como un país con estatus cuarentenario ausente de las PCC. Mientras que, respecto a los países y estados o provincias, que al año 2020 presentaron un estatus oficial presente del Cancro de los Cítricos, Clorosis Variegada de los Cítricos y Mancha Negra de los Cítricos, conforme normativa de la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria.

El marco geográfico en escala menor permitió definir 122 territorios con presencia de al menos una de las PCC consideradas amenaza para la citricultura mexicana, de los cuales 71 se clasificaron por límite administrativo conforme al país y 51 según estado o provincia. Lo que permitió identificar la existencia de cuatro regiones que se pueden considerar regiones en riesgo fitosanitario prioritario ante la posible introducción, establecimiento o dispersión de PCC en la República Mexicana. Geográficamente, por proximidad y condición fitosanitaria se denominan: Región I: Norte-Centroamérica y el Caribe, Región II: Sudamérica, Región III: Sureste Asiático y Región IV: Medio Oriente (Figura 2.1).

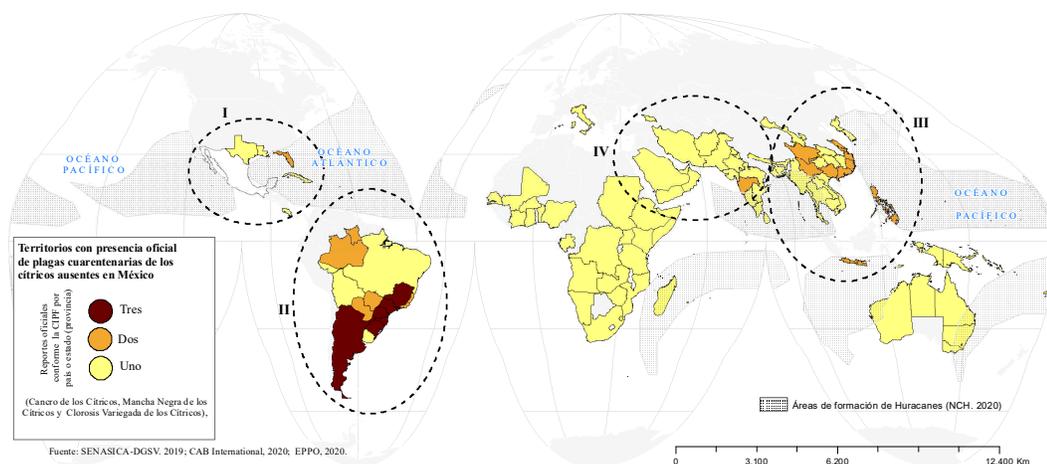


Figura 2.1. Distribución mundial de PCC bajo vigilancia epidemiológica fitosanitaria activa en México para el año 2020 (Cancro de los Cítricos, Clorosis Variegada de los Cítricos y Mancha Negra de los Cítricos). Fuente: Elaboración propia según las referencias señaladas en cada elemento del mapa.

Conforme la primera “*Ley de Tobler*” la superficie de mayor riesgo fitosanitario es la región prioritaria I, ya que se localiza adyacente o próxima la zona de formación de huracanes del Atlántico Norte y Mar Caribe, donde las condiciones ambientales asociada a estos eventos pueden favorecer en cierta medida en la dispersión de los agentes causales de las PCC presentes en la región. En este sentido, el viento favorece la diseminación del cancro de los cítricos al ser acompañado de lluvia (Gottwald, 2000) y la mancha negra de los cítricos es favorecida por una elevada precipitación como sucedió en Sudáfrica (Martínez-Minaya *et al.*, 2015) (Figura 2.1).

La segunda zona de riesgo se considera Sudamérica (región prioritaria II), donde existe la mayor densidad territorios con estatus fitosanitario presente a las tres PCC antes mencionadas “*geográficamente definidos según país / estado o provincia*” conforme fuentes oficiales (Figura 2.1). Así mismo, se definen las Regiones prioritarias III y IV, Sureste Asiático y Medio Oriente, respectivamente. Cabe señalar que, a pesar de que tales países se ubican a distancias considerables (intercontinentales), la actividad del comercio internacional puede propiciar la existencia de un determinado riesgo fitosanitario a consecuencia de la posible movilización de fuente de inóculo de cancro, mancha negra o clorosis variegada de los cítricos.

2.4. Patrones espaciales de la importación cítricos en el contexto global

Durante 2020 existió un flujo de 8,683.62 toneladas importadas a México de naranjas (frescas o secas) y cortezas de agrios (cítricos), referidas en las fracciones arancelarias “0805.10.01” y “0814.00.01”, procedentes de once países (SE-SAVI. 2021). Es pertinente resaltar que el 86.04% del volumen de importación proviene de países/estados donde a la fecha mantienen un estatus presente de al menos una de las PCC (Cuadro 2.1).

La asociación espacial “*condición fitosanitaria/flujos comerciales*” indicó que durante el año 2020 se realizó la movilización de 7,471.67 toneladas de productos o subproductos cítricos hacia México por parte de seis países que presentan una condición fitosanitaria presente en alguna extensión territorial de los mismos. En orden del volumen de importación se encuentran: Argentina (5,015.59 t), Estados Unidos (2,200.91 t), Brasil (245.43 t), Paraguay (8.7 t), China (0.833 t) y Georgia (0.212 t), que en conjunto representan el 86.04% del total de importaciones realizadas en este año conforme cifras de SE-SAVI (Figura 2.2).

Es importante señalar que los países que realizan movilización de productos y subproductos cítricos hacia México, realizan tratamientos cuarentenarios de carácter oficial respaldados por Organismos Nacionales y Regionales de Protección Fitosanitaria involucrados, lo que en buena medida otorga cierta certeza al comercio internacional. Sin embargo, de acuerdo con la FAO-NIMF No. 11 (2013), existe la probabilidad de que una plaga esté asociada con la movilización de mercancías de cualquier índole, según el lugar de origen (Figura 2.2).

2.5. Estrategias preventivas ante las plagas cuarentenarias de los cítricos realizadas por el Organismo Nacional de Protección Fitosanitaria Mexicano

Actualmente, la Organización Nacional de Protección Fitosanitaria Mexicana y el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA) administrado por la Dirección General de Sanidad Vegetal mantienen una vigilancia epidemiológica fitosanitaria activa para plagas y enfermedades prioritarias, entre las cuales se encuentran las PCC — Cancro de los Cítricos (*Xanthomonas citri* Subsp. *citri*), Mancha Negra de los Cítricos (*Guignardia citricarpa* Kiely) y Clorosis Variegada de los Cítricos (*Xylella fastidiosa* Subsp. *pauca*). Esta vigilancia permite determinar y dirigir acciones de prevención, control y erradicación, sustentando sus actividades en la Ley Federal de Sanidad Vegetal con el objetivo de

garantizar una comercialización nacional e internacional con agro-productos sanos, inocuos y de calidad (SENASICA, 2021a).

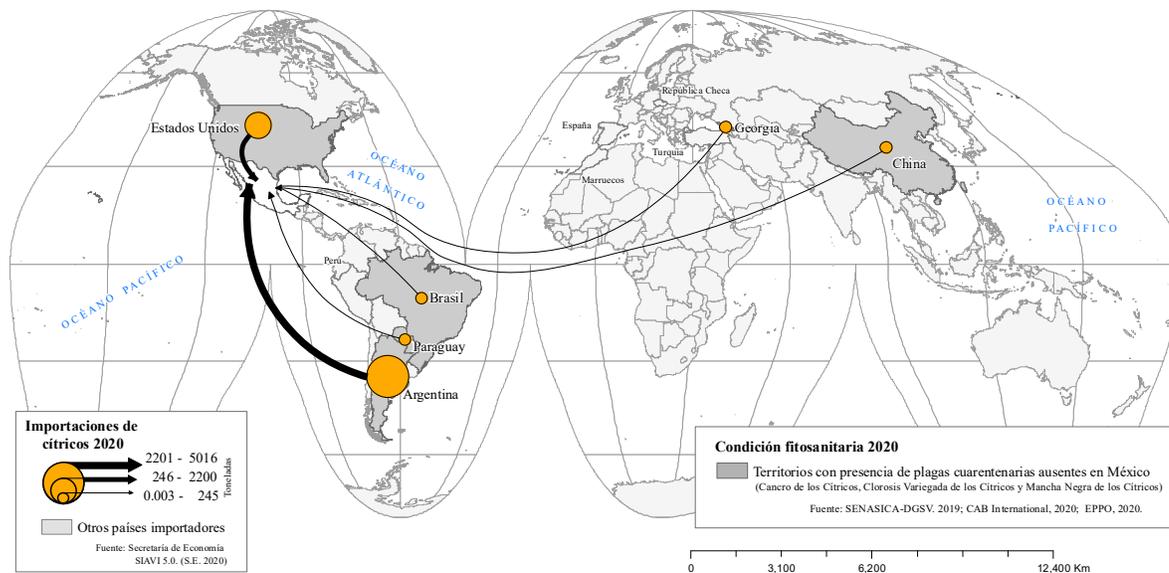


Figura 2.2. Importaciones de cítricos según las fracciones arancelarias “0805.10.01” y “0814.00.01” de países que mantienen un estatus fitosanitario presente de PCC (Cancro de los Cítricos, Clorosis Variegada de los Cítricos y Mancha Negra de los Cítricos) y ausentes en México para el año 2020. Fuente: Elaboración propia según las referencias señaladas en cada elemento del mapa.

La certeza comercial de los cítricos mexicanos se respalda en una infraestructura fitosanitaria funcional y actualizada, territorialmente distribuida en sitios estratégicos del territorio nacional en las que se realizan funciones de verificación, vigilancia, inspección y certificación fitosanitaria. Está integrada por 85 OISAs “*Oficinas de Inspección de Sanidad Agropecuaria*” (SENASICA, 2021b), 19 PVIF “*Puntos de Verificación e Inspección Federal*” (SENASICA, 2021c). Así mismo, se cuenta con 44 oficinas de inspección de sanidad agropecuaria distribuidas en sitios de ingreso de mercancías internacionales al país en 14 puertos, 14 fronteras y 20 aeropuertos (SENASICA-DGIF, 2021). Lo que permite consolidar una adecuada movilización y comercialización de productos agropecuarios mexicanos a través de la importación y exportación.

2.6. Conclusiones

La superficie territorial que representa el mayor RF en la introducción de PCC (cancro y mancha negra de los cítricos) es la región prioritaria I, en razón al principio de proximidad geográfica en asociación con un volumen de cítricos intermedio con el 23.04% del total de cítricos (productos y subproductos) importados durante 2020. Es decir, existe la condición de presencia del patógeno, así como movilización de material vegetal de carácter internacional. En orden de importancia se encuentra la región prioritaria II Sudamérica, la que a pesar de que se encuentra a una distancia mayor, existe la presencia de las tres PCC en más territorios y existen tres países que mantienen relaciones comerciales cítrícolas con México entre los que destaca Argentina, quien

movilizó el mayor volumen de cítricos (productos y subproductos), el 57.75% para el año de referencia.

Las actividades de la vigilancia epidemiológica fitosanitaria realizada para PCC direccionadas por el ONPF mexicano otorgan el soporte técnico y oficial que permite mantener un estatus fitosanitario ausente para plagas de interés cuarentenario como: cancro de los cítricos, mancha negra de los cítricos y clorosis variegada de los cítricos, fortaleciendo la competitividad comercial de los cítricos mexicanos. Lo que otorga confianza, trazabilidad y aceptación de los socios comerciales con la certeza que los cítricos mexicanos presentan sanidad, inocuidad y calidad apta para el consumo humano y por ende tienen el potencial para moverse sin riesgo alguno hacia otras regiones geográficas. Por lo que, derivado de las acciones y estrategias implementadas por organismos de vigilancia epidemiológica fitosanitaria, en cualquier día del año es posible el consumo de cítricos totalmente frescos.

2.7. Literatura citada

- Alia, T.I., Lugo-Alonso, A., Ariza-Flores, R., Valdez-Aguilar, L.A., López-Martínez, V. y Pacheco-Hernández, P. (2011). Manual de tecnología de Producción en limón persa y Naranja valencia en el estado de Morelos. INIFAP. Folleto Técnico No. 57. Consultado: 1 de junio de 2020. Disponible en: <https://bit.ly/3y7JF2m>
- Anselin, L. (2001). Spatial effects in econometric practice in environmental and resource economics. *American Journal of Agricultural Economics*. 83(3):705–710.
- CABI. 2019. CABI, 2019. Datasheet. *Xanthomonas citri*. Crop Protection Compendium. Global Module. CAB International. UK. <https://www.cabi.org/isc/datasheet/56921>
- Celemín, J.P. (2020). Cincuenta años de la Primera Ley de Tobler: revisión de sus aportes teóricos y prácticos a la ciencia geográfica. *Geografía y Sistemas de Información Geográfica*. 18(12):1–18.
- El-Otmani, M. Ait-Oubahou, A. and Zacarías, L. (2011). 21 - Citrus spp.: orange, mandarin, tangerine, clementine, grapefruit, pomelo, lemon and lime. In: Yahia, E.M. *Postharvest Biology and Technology of Tropical and Subtropical Fruits*. pp. 437–514. <https://doi.org/10.1533/9780857092762.437>
- FAO-NIMF No. 11. (2013). Análisis de riesgo de plagas para plagas cuarentenarias. Consultado: 1 de junio de 2020. Disponible en: <https://www.fao.org/3/j1302s/j1302s.pdf>
- González-Chávez, A. (2013). Posición de consenso sobre las bebidas con edulcorantes no calóricos y su relación con la salud. *Revista Mexicana de Cardiología*. 24(2):55–68.
- Gottwald, T.R. (2000). Citrus canker. The Plant Health Instructor. Consultado: 4 de octubre de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3R56rAA>
- Hernández-Macías, B. (2013). Enfermedades bacterianas asociadas a cítricos. XL Congreso Nacional y XV Congreso Internacional de la Sociedad Mexicana de Fitopatología. Consultado: 4 de octubre de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3yB274O>
- Kranz, J. 1990. Tansley Review No. 28 Fungal diseases in multispecies plant communities. *New Phytologist*. 116(3):383–405.
- López-Camelo, A.F. (2003). Manual para la preparación y venta de frutas y hortalizas. Boletín de Servicios Agrícolas de la FAO. 151. ISSN 1020-4334. <http://www.fao.org/3/y4893s/y4893s08.htm>

- Manceau, C. 2016. Disease outbreaks caused by *Xylella fastidiosa* in Europe are due to multiple introductions. *Journal of Plant Pathology*. 98:S13.
- Martínez-Minaya, J., Vicent, A., Conesa, D. y López-Quílez, A. (2015). Factores climáticos asociados con la mancha negra de los cítricos causada por *Phyllosticta citricarpa* en Sudáfrica. *PHYTOMA*. 270:36–40.
- Miller, H. J. (2004). Tobler's First Law and Spatial Analysis. *Annals of the Association of American Geographers*. 94(2):284–289.
- Mora-Aguilera, G., March, G., Marinelli, A.D. y Michereff, S.J. (2008). Epidemiología: fundamentos y aplicaciones en patosistemas agrícolas. Consultado: 2 de junio de 2018. Disponible en: <https://bit.ly/3bFWMQN>
- NIMF-CIPF. (2006). Glosario de Términos Fitosanitarios No 5. Consultado: 8 de diciembre de 2019. Disponible en: <https://bit.ly/3P18Ni0>
- Pérez, Z.O. y Orozco, R.J. (2004). Rendimiento y concentración nutrimental foliar de árboles de limón mexicano fertilizados con nitrógeno, fósforo y potasio. *Terra Latinoamericana*. 22(1):99–108.
- Rinconada C. F., García F.F. y Serna H.J.A. (2022). Especialización y ventaja comparativa del sector cítrico en México: 1990-2018. *Economía Teoría y Práctica*. 30(56):155–174.
- Rivera-López, S., Perales-Salvador, A., Del Valle-Sánchez, M. y Caamal-Cauich, I. (2020). Panorama de producción y comercialización de naranja en México. *Agro Productividad*. 13(7):9–14.
- Rybak, M.A., Schultz, D. and French, R.D. (2013). Mancha negra de los cítricos. Department of Plant Pathology and Microbiology. Consultado: 10 de diciembre de 2020. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12123/1419>
- SENASICA. (2019a). Cancro de los cítricos (*Xanthomonas citri*). Dirección General de Sanidad Vegetal - Programa de Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria. Ciudad de México. Ficha Técnica No. 33. 19 p. Consultado: 10 de diciembre de 2020. Disponible en: <https://bit.ly/3Rk9Pb9>
- SENASICA. (2019b). Clorosis variegada de los cítricos (CVC) *Xylella fastidiosa* subsp. *pauca*. Dirección General de Sanidad Vegetal - Sistema de Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria, con colaboración del Laboratorio Nacional de Referencia Epidemiológica Fitosanitaria (LaNREF). Ciudad de México. Ficha Técnica No. 34. 11 p. Consultado: 16 de febrero de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3bPv17i>
- SENASICA. (2019c). Mancha negra de los cítricos (*Phyllosticta citricarpa* / *Guignardia citricarpa*). Dirección General de Sanidad Vegetal – Programa de Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria. Ciudad de México. Última actualización: mayo, 2019. Ficha Técnica No. 36. 15 p. Consultado: 16 de febrero de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3NK4p62>
- SENASICA. (2020b). Puntos de Verificación e Inspección Federal. Datos y Recursos. Consultado: 16 de febrero de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3NACKUZ>
- SENASICA. (2021). Plagas Bajo Vigilancia Activa. Consultado: 16 de febrero de 2021. Disponible en: <https://www.gob.mx/senasica/documentos/plagas-bajo-vigilancia-activa-111260>
- SENASICA. (2021a). Sanidad Vegetal. Acciones para mejorar el estatus fitosanitario del país. Consultado: 16 de febrero de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3R0fUcm>

- SENASICA. (2021c). Infraestructura de Inspección. Consultado: 16 de febrero de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3bMDMjN>
- SENASICA-DGIF. (2021). Directorio de Oficinas de Inspección de Sanidad Agropecuaria (OISAS). Consultado: 4 de septiembre de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3R9zAe7>
- SE-SAVI. (2021). Secretaria de Economía- Sistema de Información Comercial por Internet. SIAVI 5.0. Consultado: 28 de enero de 2021. Disponible en: <http://www.economia-snci.gob.mx/>
- Siabato, W. y Guzmán-Manrique, J. (2019). La autocorrelación espacial y el desarrollo de la geografía cuantitativa. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*. 28(1):1–22.
- SIAP. (2021). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Acciones y Programas. Consultado: 28 de enero de 2021. Disponible en: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Solleiro, J.L. y Mejía, O. (2019). Producción de cítricos e innovación, una oportunidad para México. *Tecno Agro*, Vol. 132. Consultado: 28 de marzo de 2021. Disponible en: <https://tecnoagro.com.mx/table/2019/no.-132/>
- Texas A&M. (2012). AgriLife Extension Service. Consultado: 8 de julio de 2018. Disponible en: <https://bit.ly/3NFPIWY>
- USDA-GAIN. (2020). Report Name: Citrus Annual. Consultado: 2 de enero de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3a7ke9n>
- Valencia, S.K. y Duana, A.D. (2019). Los cítricos en México: análisis de eficiencia técnica. *Análisis Económico*. 87:269–283.
- Vásquez M.S.M. y Jiménez, C.C. (2012). La normativa y los estándares de calidad como garantía de competitividad, en cítricos: cultivo, poscosecha e industrialización. Caldas: Corporación Universitaria Lasallista, 367 p. (Serie Lasallista Investigación y Ciencia). Consultado: 16 de noviembre de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3aeIB4S>

CAPÍTULO 3. PLÁTANO MEXICANO EN RIESGO: LAS PRINCIPALES AMENAZAS CUARENTENARIAS DE LAS MUSÁCEAS⁶

Resumen

El objetivo del presente capítulo fue analizar las principales posibles amenazas cuarentenarias para el cultivo de plátano mexicano. Las condiciones fitosanitarias que se consideraron fueron las siguientes: la Fusariosis de las Musáceas (FocR4T), la Marchitez Bacteriana del Plátano (BXW) y el Cogollo Racimoso del Banano (BBTV), como enfermedades prioritarias señaladas por el Organismo Nacional de Protección Fitosanitaria Mexicano (SENASICA). Bajo el enfoque de la “*Segunda Ley de Tobler*”, se analizó la superficie/producción de plátano en el mundo, la condición espacial del estatus fitosanitario (presente) de las amenazas cuarentenarias de la República Mexicana. A escala global, se analizó el aporte de los países productores de plátano (superficie sembrada y producción); a escala regional, se identificó la existencia de dos territorios próximos a México con presencia de FocR4T a 1800 y 2500 km de distancia y un tercero con estatus oficial presente de BBTV a 4200 km; mientras que, a escala nacional, se presentó la superficie sembrada y producción de plátano en México, así como la distribución espacial de los municipios con hospedantes de importancia económica en México. Se concluye que, México sí presenta riesgos potenciales fitosanitarios que pudieran poner en riesgo la producción de plátano. En este sentido, resultan importantes las actividades que se pudieran realizar a través del Programa de Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria enfocado a plagas cuarentenarias del plátano en México.

Palabras clave: Plátano, México, amenazas cuarentenarias, riesgo de plagas.

Abstract

The objective of this chapter was to analyze the main possible quarantine threats to the Mexican banana crop, at different spatial scales. The phytosanitary conditions considered were the following: Fusariosis of Musaceae (FocR4T), Banana Bacterial Wilt (BXW) and Banana Bushy Top (BBTV), as priority diseases identified by the Mexican National Plant Protection Agency (SENASICA). Under the approach of "*Tobler's Second Law*", the area/production of banana in the world, the spatial condition of the phytosanitary status (present) of the quarantine threats of the Mexican Republic were analyzed. At the global scale, the contribution of banana producing countries (planted area and production) was analyzed; at the regional scale, the existence of two territories close to Mexico with presence of FocR4T at 1800 and 2500 km of distance were identified, and a third with present official status of BBTV at 4200 km, while at the national scale, the planted area and production of banana in Mexico was investigated, as well as the spatial distribution of municipalities with economically important hosts in Mexico. It was concluded that, Mexico does present potential phytosanitary risks that could endanger banana production. In this sense, the activities that could be carried out through the Phytosanitary Epidemiological Surveillance Program focused on banana quarantine pests in Mexico are strongly required.

Keywords: Banana, Mexico, quarantine threats, pest risk.

⁶ ARTÍCULO DE DIVULGACIÓN PREPARADO como: Ibarra-Zapata, E., Mora-Aguilera, G., Aguirre-Salado, C.A. Plátano Mexicano en riesgo: las principales amenazas cuarentenarias de las musáceas, PARA SOMETERSE A ARBITRAJE.

3.1. Introducción

El plátano (*Musa paradisiaca*) es un cultivo de alta importancia económica y social en México y en el mundo (García-Mata *et al.*, 2013). No obstante, el sistema producto plátano se encuentra bajo la amenaza latente de diferentes plagas de interés cuarentenario. De acuerdo con el Organismo Nacional de Protección Fitosanitaria Mexicano (SENASICA), las principales amenazas son: la Fusariosis de las Musáceas (*Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (E.F. Sm.) W.C. Snyder & H.N. Hansen Raza 4 Tropical) (FocR4T) (SENASICA. 2019a), la Marchitez Bacteriana del Plátano (*Xanthomonas vasicola* pv. *musacearum* (Yirgou & Bradbury 1968; Dye 1978) (BXW) (SENASICA. 2019b) y el Cogollo Racimoso del Banano (*Banana bunchy top virus*) (BBTV) (SENASICA. 2019c).

En México, estas enfermedades cuentan con una categorización de plagas cuarentenarias, ya que, no se encuentran presentes en el país. Sin embargo, potencialmente pueden causar pérdidas económicas en cultivos hospedantes (FAO-IPPC, NIMF No. 5, 2009). Sin duda alguna representan un riesgo fitosanitario que puede ocasionar reducciones importantes en la producción nacional del cultivo al ser consideradas como “*plagas devastadoras*”, con posibles afectaciones al cuarto alimento más importante en el mundo, después del arroz, el trigo y el maíz (Shankar y Mondal, 2016). Además, el plátano se considera uno de los productos más importantes para la seguridad alimentaria, y que, a la vez, es una fuente importante en la generación de empleos (SG-CAN. 2020).

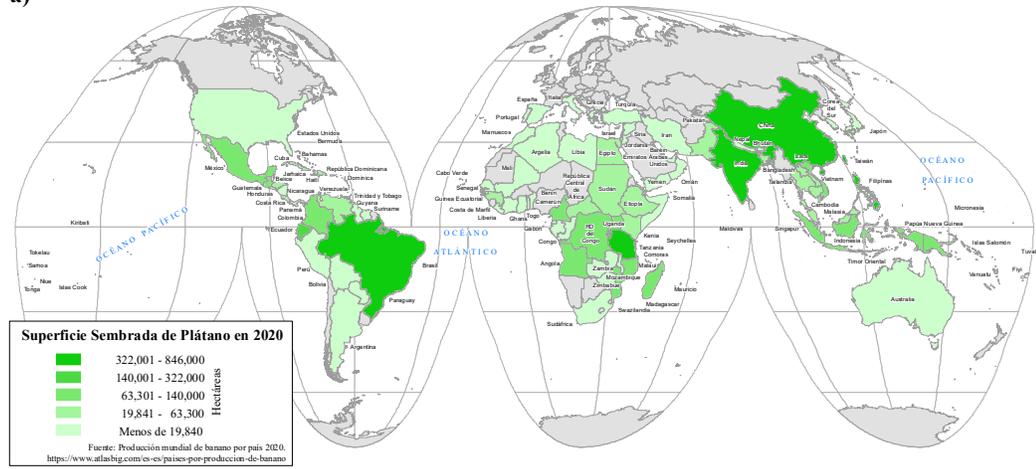
La condición espacial involucra la interrelación entre elementos que se desarrollan en un contexto definido por entidades geográficas. Es decir, se establecen las propiedades espaciales a través de relaciones de división y medidas de proximidad, lo que permite cuantificar el alejamiento entre partes disjuntas de los objetos geográficos relacionados (Nedas *et al.*, 2007). Para este caso se refiere a tener un lugar con estatus fitosanitario “*presente*” vs simplemente “*áreas productoras de plátano*” en México. Este proceso de asociación se fundamentó en el enfoque de la Segunda Ley geográfica propuesta por Tobler (1999) que señala “*todo fenómeno externo a un área, afecta lo que sucede dentro*”. Por ello, el objetivo del presente estudio fue analizar las principales amenazas cuarentenarias para el cultivo de plátano mexicano a diferentes escalas espaciales: global, regional (varios países) y nacional.

3.2. El contexto del cultivo de plátano en el mundo

Durante 2020, existió una superficie sembrada de 5,493,932 ha de cultivo de plátano en el mundo distribuida en 123 países, de los cuales se obtuvo una producción de 113,212,452 toneladas del cultivo. Los países que poseen la mayor superficie destinada al cultivo del plátano son: India (846,000 ha), seguido de Brasil, Tanzania, Filipinas y República Popular China que cuentan con más de 430 mil hectáreas bananeras cada uno. Mientras que México se posicionó en el 15° lugar con una superficie sembrada de 78,322 ha de cultivo de plátano (Figura 3.1a).

Desde el punto de vista de producción de plátano, India aporta el 25.72% de la producción, seguido de China con el 11.77%, así como Indonesia (6.19%), Brasil (5.97%), Ecuador (5.77%) y Filipinas (5.15%) y el resto de los países cuentan con menos de 3.42% cada uno, México se encontró en el 12° lugar con 2,384,778 toneladas equivalente al 2.11% de la producción registrada (Figura 3.1b).

a)



b)

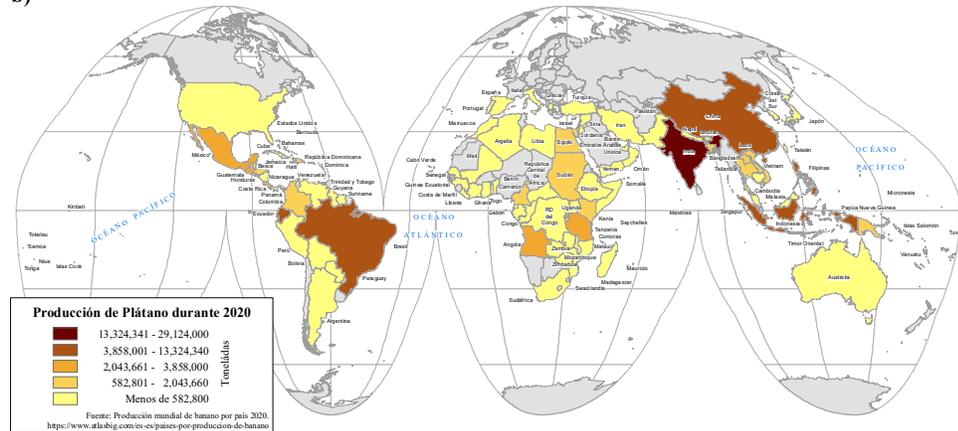


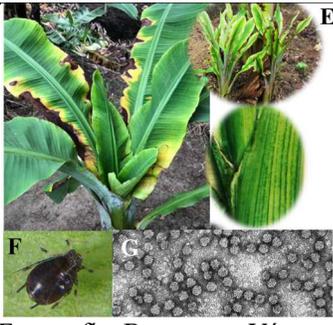
Figura 3.1. Panorama mundial del cultivo de plátano. a) Superficie sembrada de plátano por país y b) Producción de plátano por país. Fuente: <https://www.atlasbig.com/es-es/paises-por-produccion-de-banano>

3.3. Amenazas cuarentenarias prioritarias para el cultivo de plátano mexicano

Los cultivos de plátano o banano son susceptibles a problemas fitosanitarios causados por patógenos como FocR4T, BXW y BTTV, que de acuerdo con el Organismo Nacional de Protección Fitosanitaria Mexicano se consideran de interés cuarentenario. La dispersión y posibles afectaciones de estas enfermedades dependen en buena medida de la movilización de material vegetativo infectado o enfermo (plántulas, cornos, hijuelos, etc.). Sin embargo, existen algunas peculiaridades epidémicas que a continuación se describen:

- I. Fusariosis de las Musáceas (FocR4T, por las siglas del agente causal) se considera un patógeno extremadamente severo que puede afectar a un grupo considerable de variedades de Musáceas que tienen importancia para la seguridad alimentaria, no solo la variedad Cavendish, es decir, afecta cultivos estratégicos con repercusiones a la generación de ingresos económicos (Dita *et al.*, 2018).
El agente causal de la Fusariosis de las musáceas es un hongo que vive en el suelo. Puede llegar a sobrevivir hasta por más de 30 años (Stover, 1962). En el Sureste Asiático se han presentado grandes afectaciones, incluso, se encuentra presente en grandes extensiones donde ha ocasionado pérdidas millonarias, además de un alto costo en las medidas de manejo (OIRSA, 2020). La Fusariosis de las musáceas afecta raíz, tallo y otras estructuras del género *Musa*. Sin embargo, el fruto no es portador del hongo, por lo que no existe riesgo al consumir la fruta (ICA, 2021). Algunas características del patógeno se aprecian en el Cuadro 3.1a.
- II. Marchitez Bacteriana del Plátano (BXW, por sus siglas en inglés) se ha considerado la enfermedad más devastadora de los platanos localizados en la región de los grandes lagos en África Central y Oriental, ocasionando pérdidas totales en el rendimiento de plantas infectadas (Ssekiowoko *et al.*, 2006 y Tripathi *et al.*, 2009). En el África subsahariana, — que incluyen a todos los países que no colindan con el mar Mediterráneo, es un patógeno altamente limitante en la producción de racimos de plátano o banano, con daños estimados entre 70 y 90% en áreas afectadas (Kumar *et al.*, 2015). Esta enfermedad puede infectar a todos los genotipos de bananos, ya que se disemina de forma rápida por el trasiego de herramientas del campo. Por lo que se recomienda aplicar medidas extremas de control, por ejemplo, restringir el movimiento de material vegetal de los territorios donde existe su presencia (Manzo-Sanchez *et al.*, 2014) (Cuadro 3.1b).
- III. Cogollo Racimoso del Banano (BTTV, por sus siglas en inglés) en África Oriental en la región de los Grandes Lagos, ha destruido plantaciones completas donde se estiman pérdidas de entre 2000 y 8000 millones de dólares en una década (Fresh-Plaza, 2021). Su control implica acciones de cuarentena para evitar el ingreso a territorios libres, complementado con la erradicación de plantas infectadas que sirven como fuente de inóculo (Thomas *et al.*, 2000) (Cuadro 3.1c).

Cuadro 3.1. Características de las principales amenazas cuarentenarias para el plátano mexicano. a) Fusariosis de las Musáceas (*Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (E.F. Sm.) W.C. Snyder & H.N. Hansen Raza 4 Tropical), b) Marchitez Bacteriana del Plátano (*Xanthomonas vasicola* pv. *musacearum* (Yirgou & Bradbury 1968; Dye 1978) y c) Cogollo Racimoso del Banano (*Banana bunchy top virus*).

	a) FocR4T	b) BTTV	c) BXW
Apariencia en Cultivo	 <p>Fotografía: SG-CAN (2020).</p>	 <p>Fotografía: Betancourt-Vásquez (2020)</p>	 <p>Fotografía: HV-CF-FAUBA (2021).</p>
	(A) Síntomas externos con un extenso amarillamiento foliar, así como también el colapso de las hojas alrededor del pseudotallo y agrietamiento del pseudotallo; (B-C) síntomas internos mostrando el enrojecimiento de los haces vasculares en el pseudotallo y el corno.	(D) Banano infectado y síntomas del virus en follaje. (E) Pulgón del banano vector del virus BTTV en los plátanos y (F) Babuvirus (Familia Nanoviridae).	(H) Amarillamiento y marchitamiento en las hojas, (I) Maduración prematura de la fruta y (J) Exudado bacteriano.
Medios de dispersión	El material vegetal infectado, el agua contaminada y las herramientas / maquinaria con suelo infestado son los medios principales para dispersar el patógeno (SG-CAN. 2020).	Se puede propagar vegetativamente mediante chupones o plantas de cultivo de tejidos infectados, provoca reducción del rendimiento del cultivo lo que desencadena en una barrera para el intercambio internacional (Kumar <i>et al.</i> , 2015).	Se dispersa por movilización de material vegetal infectado, herramientas contaminadas y algunos insectos favorecen la dispersión (Familia: <i>Apidae</i>), moscas de la fruta (Familia: <i>Tephritidae</i>) y moscas de hierba (Familia: <i>Chloropidae</i>) (SENASICA, 2019b).

Fuente: Elaboración propia con las referencias señaladas.

3.4. Condición espacial de las amenazas cuarentenarias del plátano prioritarias para México

La condición espacial se sustentó en el supuesto de que existe un riesgo fitosanitario para la producción de plátano mexicano, al considerar la proximidad, respecto a los países que mantienen la presencia de al menos una de las enfermedades cuarentenarias del plátano (FocR4T, BTTV o BXW).

El principal riesgo fitosanitario se asoció a la Fusariosis de las musáceas, que se detectó en 2019 en el continente americano, particularmente en el área de producción de plátano en las veredas Las Flores y Pelucha localizadas en Dibulla y Riohacha, La Guajira, Colombia (ICA, 2019), a 1800 km de distancia; así como en la zona productora del distrito de Querecotillo, provincia de Sullana, Departamento de Piura, Perú (SENASA. 2021), a por lo menos 2500 km de distancia; mientras que, por proximidad, y en tercer lugar se encuentra Hawai, E.U.A. a 4,200 km., donde se mantiene un estatus fitosanitario “*presente*” al cogollo racimoso del banano (Figura 3.4).

En Asia, África y Australia se encuentran territorios administrativos con presencia de por los menos una de las tres enfermedades (FocR4T, BTTV o BXW); sin embargo, no por encontrarse en otros continentes, no significa que no representen un riesgo fitosanitario para los países productores plátano o banano en América. Ya que, resultado de los procesos de globalización como el intercambio comercial, el turismo y la migración humana el riesgo fitosanitario asociado a plagas cuarentenarias del plátano o banano continúa siendo una amenaza latente, ya que existen plantaciones de importancia económica. En este sentido, 34 países del continente americano en conjunto aportaron el 21.60% de la superficie sembrada mundial del cultivo de plátano a banano, lo que representó el 24.9% de la producción del año 2020 (Figura 3.2).

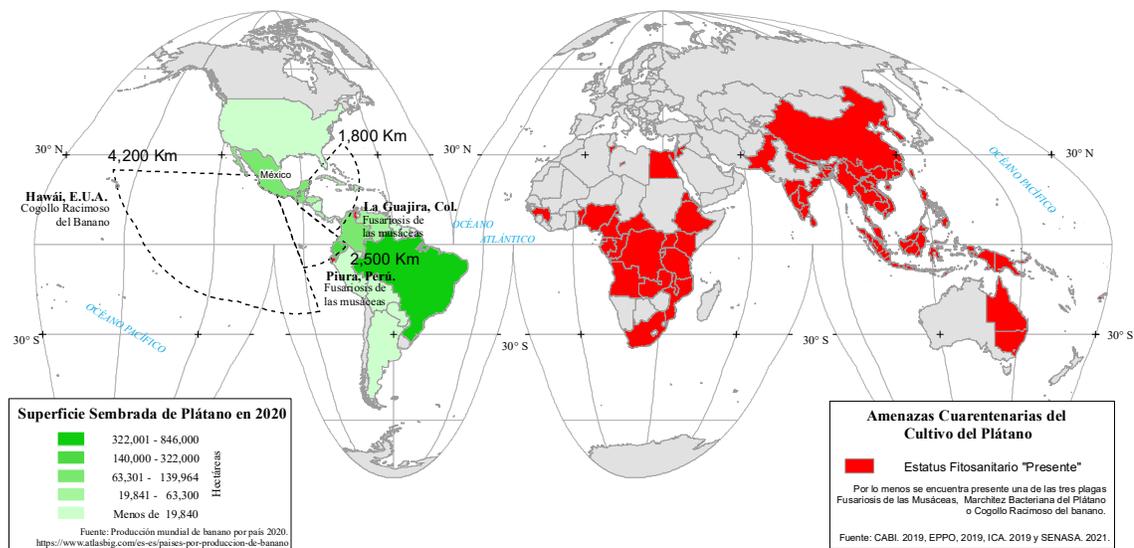


Figura 3.2. Condición espacial de las principales amenazas cuarentenarias para el sistema producto de plátano en México. Fuente: CABI (2019), EPPO (2019), ICA (2019) y SENASA (2020).

3.5. Situación del sistema producto plátano en México

La República Mexicana presentó una superficie sembrada de 80,546.74 ha de plátano distribuidas en 16 estados durante el año 2020. Sin embargo, Chiapas Veracruz y Tabasco aportaron la mayor extensión territorial el 63.45% de la superficie sembrada, equivalente a 51,112 ha, con una superficie media de 5,034 ha. Por el contrario, Quintana Roo, Yucatán, Campeche, México, Hidalgo y Morelos solamente 1,183 hectáreas en conjunto lo que representó el 1.46% (Figura 3.5).

A escala municipal, la mayor superficie sembrada de plátano se agrupó en: Teapa, Tab. (7,439 ha); Suchiate, Chis (5,503); Coahuayana, Mich. (4,589 ha) y Tecomán, Col. (4,158 ha) que en conjunto aportan el 26.92% de la superficie sembrada nacional. En complemento y con las menores extensiones se encuentran: Atenango del Río en el estado de Guerrero, Malinalco en el estado de Estado de México, Huetamo en el estado de Michoacán, Soledad Doblado en el estado de Veracruz, Muna y Cantamayec en el estado de Yucatán. La Figura 3.3 muestra las regiones donde se concentran los mayores/menores productores del país.

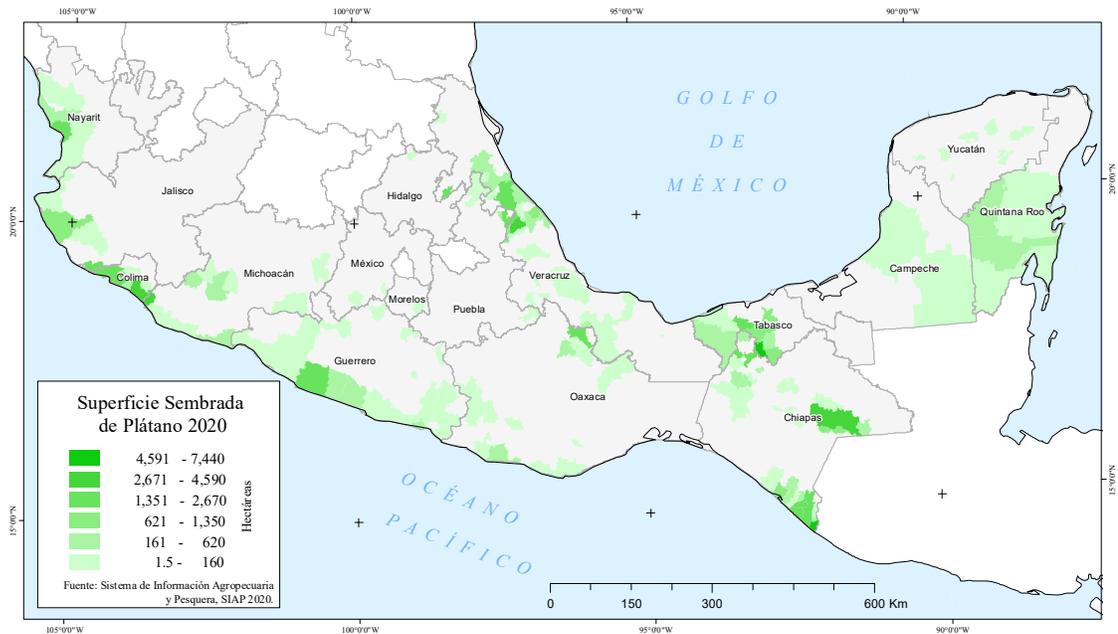


Figura 3.3. Superficie sembrada del sistema producto plátano en México. Fuente: Sistema de Información Agropecuario y Pesquero (SIAP-AGRICULTURA, 2020).

A escala nacional, el 74.47% de la producción de plátano mexicano recae en cuatro estados — Chiapas (701,501 t), Tabasco (601,608 t), Veracruz (324,733 t) y Colima (207,433 t), con una producción media de 154,011 t. En contraparte, Quintana Roo (9,881 t), Yucatán (1,474 t), Campeche (1,249 t), Morelos (277 t), Estado de México (225 t) e Hidalgo (56 t) que en conjunto solamente aportaron el 0.53%, equivalente a 13,163 t.

Los municipios que concentran 50.88% de la producción nacional de plátano son Teapa, Tab. (453,612 t), Suchiate, Chis. (205,605 t), Coahuayana, Mich. (142,747 t), Tecomán, Col. (137,024 t), Cihuatlán, Jal. (128,251 t), Tapachula, Chis. (96,416 t) y San Rafael, Ver. (90,132 t). Cabe señalar que, 63 municipios con una producción menor a las 200 ton cada uno en conjunto aportaron el 0.27% del total de la producción de plátano (Figura 3.4), lo que revela dónde se ubican los municipios con mayor/menor producción de plátano.

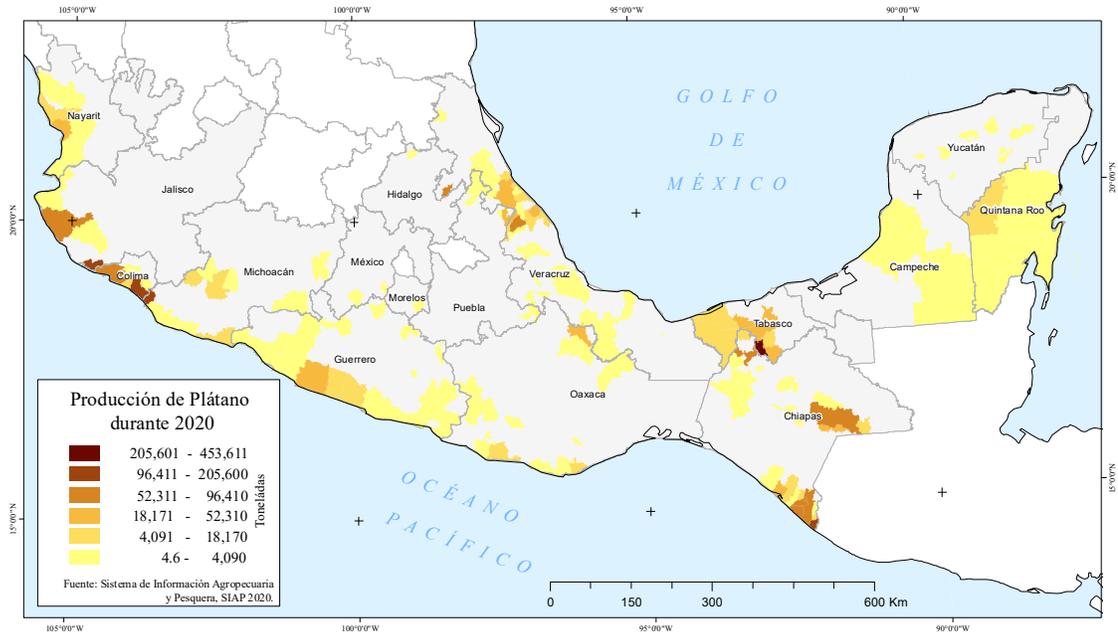


Figura 3.4. Producción de plátano en México. Fuente: Sistema de Información Agropecuario y Pesquero, SIAP-AGRICULTURA. 2020.

3.6. La cultura de la prevención en México

México soporta sus estrategias preventivas contra plagas cuarentenarias de plátano en la NOM-010-FITO-1995 (DOF. 1995), *por medio de la cual se establecen los criterios para prevención de la introducción de plagas del plátano, en la que se señalan las directrices preventivas en la introducción, establecimiento y diseminación de plagas cuarentenarias del plátano a territorio nacional*. Así como la Norma Oficial Mexicana NOM-008-FITO-1995, *en la que se establecen los requisitos y especificaciones fitosanitarios para la importación de frutas y hortalizas frescas*.

Además, el ONPF mantiene el Programa de Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria, que opera con una vigilancia activa en áreas agrícolas, silvestres, marginales y urbanas (SENASICA, 2020). La vigilancia activa de plagas cuarentenarias se realiza en zonas de riesgo potencial ante el posible ingreso de plagas exóticas como FocR4T, BTTV y BXW a territorio mexicano (SENASICA, 2020a).

Actualmente en México, se realiza una vigilancia epidemiológica fitosanitaria activa a cargo del ONPF por medio de la Dirección General de Sanidad Vegetal, SENASICA, que realiza estrategias operativas como rutas de vigilancia en zonas de riesgo (traspacios, zonas turísticas, centros de acopio, viveros, y centros de almacenamiento), establecimiento de parcelas centinelas en sitios de riesgo, así mismo la realización de exploración en área de producción. Derivado de estas acciones FocR4T, BTTV y BXW, mantienen un estatus fitosanitario “ausente” en México, ya que no existen registros de presencia de la plaga, como lo señala la NIMF No. 8 (2017).

Finalmente es pertinente señalar que de acuerdo con autoridades fitosanitarias del ONPF mexicano “Dirección de Regulación Fitosanitaria —SENASICA” en 2009 se realizó una modificación a la NOM-FITO- 010-1995 al artículo único (párrafo del punto 4.1 Productos de

cuarentena absoluta) en la que se señaló que “*Se prohíbe la introducción de frutos frescos de plátano, plantas de plátano y sus partes, así como sus envases y embalajes originarios o procedentes de los países afectados por la presencia de plagas del plátano de importancia cuarentenaria para el país*”, y sólo se permite el tránsito (sin apertura de contenedores). Además, recientemente en 2019 a consecuencia de las detecciones recientes de FocR4T en Colombia (ICA, 2019), se suspendió la importación de material vegetal propagativo “*In Vitro*” del género *Musa spp* y *Heliconia spp*. Es decir, hoy en día como medida preventiva en México se encuentra prohibida la importación de material propagativo, frutos y subproductos derivados del plátano y sólo se permite el tránsito por territorio nacional en condiciones controladas o muy específicas de acuerdo a especificaciones del ONPF mexicano y su contraparte en la negociación comercial.

3.7. Conclusiones

Sin duda alguna, las amenazas cuarentenarias del plátano o banano (FocR4T, BXW y BBTV) se consideran riesgos fitosanitarios prioritarios no solo para México sino para los 33 países del continente americano donde se produce el cultivo. Ya que, la distancia intercontinental no fue un impedimento para que ocurrieran dos detecciones en territorios distintos (Colombia y Perú) con diferente temporalidad, lo que debe considerarse como un primer aviso para fortalecer las acciones estratégicas y conjuntas entre las organizaciones Nacionales y Regionales de Protección Fitosanitaria.

Es importante fortalecer la investigación de carácter trans y multidisciplinaria con el propósito de perfeccionar los programas de vigilancia epidemiología fitosanitaria de plagas cuarentenarias del plátano o banana nacionales y regionales, así como extremar acciones preventivas de manera conjunta entre productores, organismos de protección fitosanitaria, centros de investigación y consumidores finales. Ya que, hoy en día todos sabemos lo que implica un problema sanitario con un potencial pandémico “*gracias al COVID-19*”, y sin duda alguna podemos imaginar las implicaciones al sistema producto plátano ante una amenaza como la Fusariosis de las musáceas, la Marchitez Bacteriana del Plátano o el Cogollo Racimoso del Banano.

3.8. Literatura citada

- Betancourt-Vásquez, M. 2020. Modelo para la introducción de materiales promisorios de musáceas por su resistencia a Foc R4T en Colombia. *In: Taller Regional de Capacitación Virtual. Marchitez por Fusarium Raza 4 Tropical en banano, plátano y otras musáceas.* Consultado: 1 de marzo de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3AmhZtc>
- Dita, M., Barquero, M., Heck, D., Mizubuti, E.S.G. 4 y Staver, C.P. (2018). Fusarium Wilt of Banana: Current Knowledge on Epidemiology and Research Needs Toward Sustainable Disease Management. *Frontiers Plant Science.* 9:1468.
- DOF. (1995). NOM-010-FITO-1995. Modificación de la Norma Oficial Mexicana NOM-010-FITO-1995, Por la que se establece la cuarentena exterior para prevenir la introducción de plagas del plátano. Consultado: 6 de junio de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3unEw1D>
- FAO-IPPC, NIMF No. 5. (2009). Glossário de termos fitossanitários. Normas internacionais para Medidas Fitossanitárias NIMF No.5. Consultado: 6 de agosto de 2019. Disponible en: <https://bit.ly/3ulPsAc>
- Fresh-Plaza. (2021). Control de la marchitez bacteriana de la banana en África oriental. Consultado: 6 de septiembre de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3I94rDv>

- García-Mata, R., González-Machorro, M.F., García-Sánchez, R.C., Mora-Flores, S., González-Estrada, A. y Martínez-Damián, MA. (2013). Banana (*Musa paradisiaca*) market in México, 1971-2017. *Agrociencia*. 47:399–410.
- HV-CF-FAUBA. 2021. Marchitamiento bacteriano del banano (BXW o BBW) (*Xanthomonas vasicola* pv. *musacearum*). Herbario Virtual- Cátedra de Fitopatología- FAUBA. Consultado: 6 de enero de 2022. Disponible en: <https://bit.ly/3I94rDv>
- ICA. 2019. Primera detección de marchitez por *Fusarium oxysporum* f.sp. *cubense* Raza 4 Tropical FOC R4T. Instituto Colombiano Agropecuario. Consultado: 10 de agosto de 2019. Disponible en: <https://bit.ly/3yfbINX>
- ICA. (2021). FUSARIUM R4T. Consultado: 3 de noviembre de 2021. Disponible en: <https://www.ica.gov.co/icacomunica/pyp/fusarium-r4t>
- Kumar, P.L., Selvarajan, R., Iskra-Caruana, M.L., Chabannes, M y Hanna, R. (2015). Chapter Seven - Biology, Etiology, and Control of Virus Diseases of Banana and Plantain. *Advances in Virus Research*. 91: 229–269.
- Manzo-Sánchez, G., Orozco-Santos, M., Martínez-Bolaños, L., Garrido-Ramírez, E. y Canto-Canche, B. (2014). Enfermedades de importancia cuarentenaria y económica del cultivo de banano (*Musa* sp.) en México. *Revista Mexicana de Fitopatología*. 32(2):89–107.
- Nedas, K., Egenhofer, M. and Wilmsen, D. (2007), Metric details of topological line-line relations. *International Journal of Geographical Information Science*. 21(1):21–48.
- NIMF No. 8. (2017). Determinación de la situación de una plaga en un área. Consultado: 3 de abril de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3I9nTzY>
- OIRSA. (2020). Marchitez por *Fusarium* en banano (*Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Raza 4 Tropical). Consultado: 25 de julio de 2021. Disponible en: <https://www.oirsa.org/informacion.aspx?id=86>
- SENASA. (2021). PERU: Primer Reporte sobre *Fusarium oxysporum* f.sp. *cubense* Raza 4 Tropical, W.C. Snyder & H.N. Hansen 1940. Consultado: 1 de mayo de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3NEr3Nk>
- SENASICA. (2020a). Plagas bajo vigilancia activa. Consultado: 1 de septiembre de 2021. Disponible en: <https://www.gob.mx/senasica/documentos/plagas-bajo-vigilancia-activa-111260>
- SENASICA. (2020b). Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria (SINAVEF). Consultado: 5 de octubre de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3R2mdMN>
- SENASICA. (2019a). Fusariosis de las musáceas (*Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* raza 4 Tropical) (Foc R4T). Dirección General de Sanidad Vegetal-Programa de Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria, con la colaboración del Dr. Luciano Martínez Bolaños (investigador científico). Cd. de México. Ficha Técnica No. 2. 29 p. Consultado: 1 de septiembre de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3eg0JJ9>
- SENASICA. (2019b). Marchitez bacteriana del plátano (*Xanthomonas vasicola* pv. *musacearum*). Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria-Dirección General de Sanidad Vegetal-Programa de Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria. Con la colaboración del Dr. Luciano Martínez Bolaños. Ciudad de México. Ficha Técnica No. 32.15 p. Consultado: 19 de septiembre de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3R7jJwE>
- SENASICA. (2019c). Cogollo racimoso del banano (*Banana bunchy top virus*). Dirección General de Sanidad Vegetal-Programa de Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria. Cd. de México.

Ficha Técnica No. 31. 18 p. Ficha Técnica No. 32. 15 p. Consultado: 5 de octubre de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3AmiwLO>

- SENASICA. (2021). Módulo de consulta de requisitos fitosanitarios para la importación de mercancía de origen vegetal. Consultado: 1 de marzo de 2022. Disponible en: <https://sistemasssl.senasica.gob.mx/mcrfi/>
- SG-CAN. (2020). Guía andina para el diagnóstico de Fusarium Raza 4 Tropical (R4T) *Fusarium oxysporum* f.sp. *cubense* (syn. *Fusarium odoratissimum*) agente causal de la marchitez por Fusarium en musáceas (plátanos y bananos). Primera edición. Consultado: 6 de octubre de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3nDikQE>
- Shankar, A.K y Mondal, A. (2016). Integrated Pest Management in Banana. Abrol, D.P. (Ed.) *In: Integrated Pest Management in the Tropics*. pp. 329–349. <https://bit.ly/3OIpZcm>
- Ssekiwoko, F., Taligoola, H.K., and Tushemereirwe, W.K. (2006). *Xanthomonas campestris* pv *musacearum* host range in Uganda. *African Crop Science Journal*. 14(2):111–120.
- Stover, R.H. (1962). Fusarial wilt (Panama disease) of bananas and other *Musa* species. Commonwealth Mycological Institute, Reino Unido. 117p. Consultado: 6 de noviembre de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3R9w8Qm>
- Thomas, J.E., Iskra-Caruana, M.L., Magnate, L.V., and Jones, D.R. (2000). Disease caused by virus. Bract mosaic. En: D.R. Jones (ed.) *Diseases of Banana, Abaca and Enset*, CABI Publishing, Wallingford, UK. Consultado: 15 de diciembre de 2021. Disponible en: <https://www.cabi.org/bookshop/book/9781780647197/>
- Tripathi, L., Mwangi, M., Abele, S., Aritua, V., Tushemereirwe, K., Bandyopadhyay, R. (2009). *Xanthomonas* Wilt, a threat to banana production in East and Central Africa. *Plant Disease*. 93(5):440–451.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS GEOESPACIAL FITOSANITARIO DE LA FUSARIOSIS DE LAS MUSÁCEAS A NIVEL GLOBAL, CON ÉNFASIS EN AMÉRICA PANTROPICAL ⁷

Resumen

La comúnmente llamada Fusariosis de las Musáceas es una enfermedad ocasionada por *Fusarium oxysporum*, f. sp. *cubense* raza 4 tropical (FocR4T), un patógeno que representa una amenaza para la seguridad alimentaria global, ya que es responsable de pérdidas considerables en la producción de plátano y banano en el mundo. Por casi 30 años, su presencia se restringió al Sureste Asiático, sin embargo, en agosto de 2019 se detectó por primera vez en Colombia y se consideró un nuevo riesgo fitosanitario en América. En este capítulo, se modelaron los patrones espaciales de (FocR4T) a nivel global y subcontinental (América pantropical) bajo un enfoque que incluyó el uso de los componentes epidémico y espacial, la distribución potencial (patógeno/hospedante) y el potencial de daño económico por asociación espacial de nodos comerciales (origen/destino), lo cual se integró mediante una evaluación multicriterio (MCDA). Territorialmente se caracterizaron cinco niveles de riesgo fitosanitario (muy alto, alto, medio, bajo y muy bajo). A escala global, se determinó la existencia de cuatro áreas focales donde existen condiciones para la ocurrencia de la enfermedad. En América Pantropical, se determinó la existencia de 26,598 km² en riesgo fitosanitario muy alto (>0.9) ubicado por mayor extensión en Ecuador, Brasil, México, Guyana, Guatemala, Venezuela, Panamá y Colombia, además existen 15.8 millones de km² con un nivel de riesgo inferior. La cartografía obtenida representa una herramienta valiosa para fortalecer y direccionar las acciones preventivas en la dispersión de este patógeno en la región y se considera un insumo técnico/científico que fortalece el análisis de riesgo de plagas realizado por las organizaciones regionales y nacionales de protección fitosanitaria.

Palabras clave: *Fusarium oxysporum* Raza 4 Tropical, *Fusarium odoratissimum*, análisis espacial, plátano, riesgo fitosanitario.

Abstract

Commonly called Fusariosis of Musaceae is a disease caused by *Fusarium oxysporum*, f. sp. *cubense* race 4 tropical (FocR4T), a pathogen that represents a threat to global food security, because it is responsible for considerable losses in banana and plantain production in the world. For almost 30 years, its presence was restricted to Southeast Asia; however, in August 2019, it was detected for the first time in Colombia and was considered a new phytosanitary risk in the Americas. In this chapter, the spatial patterns of (FocR4T) at the global and the subcontinental (pantropical America) levels were modeled under an approach that included the use of epidemic and spatial components, potential distribution (pathogen/host) and the potential for economic damage by spatial association of commercial nodes (origin/destination), which was integrated through multi-criteria assessment (MCDA). Territorially, five levels of phytosanitary risk were characterized (very high, high, medium, low and very low). At the global scale, four focal areas were identified where conditions for the occurrence of the disease exist. In Pantropical America, 26,598 km² were found to be at very high phytosanitary risk (>0.9), located mainly in Ecuador, Brazil, Mexico, Guyana, Guatemala, Venezuela, Panama and Colombia; there are also 15.8

⁷ ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN PUBLICADO en REVISTA CONACYT como: Ibarra-Zapata, E., Aguirre-Salado, C.A., Miranda-Aragón, L., Escoto-Rodríguez, M., Loredó-Osti, C., Mora-Aguilera, G., Casiano-Domínguez, M., Aguirre-Salado, A.I., Ramos-Méndez, C., Villegas-Jiménez, N., Urías-Morales, C.R., y González-Gómez, R. 2021. Análisis geoespacial fitosanitario de la Fusariosis de las Musáceas a nivel global, con énfasis en América Pantropical. *Investigaciones Geográficas del Instituto de Geografía de la UNAM*: e60466. DOI: dx.doi.org/10.14350/rig.60466.

million km² with a lower level of risk. The map obtained represents a valuable tool for strengthening and directing preventive actions against the spread of this pathogen in the region and is considered a technical/scientific input that strengthens the pest risk analysis carried out by regional and national plant protection organizations.

Keywords: *Fusarium oxysporum* Race 4 Tropical, *Fusarium odoratissimum*, spatial analysis, banana, phytosanitary risk.

4.1. Introducción

Fusarium oxysporum f. sp. *cupense* Raza 4 Tropical (FocR4T), recientemente clasificado como *Fusarium odoratissimum* (Maryani, Lombard, Kema & Crous, 2019) es una enfermedad cuarentenaria, considerada letal por ocasionar daños irreversibles para el cultivo (Dita *et al.*, 2018), puede provocar afectaciones cercanas al 40%, incluso logró devastar plantaciones de plátano en diferentes países de Asia, Medio Oriente, África y Oceanía (García-Bastidas *et al.*, 2014). La primera detección en América representó un desafío para producción platanera de Latinoamérica y el Caribe, donde se cultiva el 36.4% de la producción mundial, con exportaciones de 14.5 millones de toneladas, equivalente al 66.2% del producto interno bruto de la economía regional. La probabilidad de establecimiento, dispersión y potencial de daño económico (PDE) por Fusariosis de las musáceas es alto, con posibles afectaciones en 1.3 millones de hectáreas y daños directos a 12.3 millones de personas que viven del cultivo (Dita *et al.*, 2018).

La modelación geoespacial da el soporte a la toma de decisiones estratégicas en agricultura, ya que permite analizar de manera conjunta los requerimientos óptimos para estimar la probabilidad relativa en la invasión de plagas agrícolas (Donatelli *et al.*, 2017; Tuomola *et al.*, 2018), donde un elemento clave se considera el movimiento internacional de mercancías que posibilita el incremento en la dispersión de riesgos fitosanitarios entre regiones geográficas (Dyer *et al.*, 2017), e incluso se ha empleado como indicador en la determinación de la dispersión del riesgo fitosanitario (Thangavelu *et al.* 2020).

En 2016, se estimó una superficie de plátano de poco más de 20 millones de hectáreas distribuidas en 142 países, con una producción estimada de 289 mil toneladas. De lo cual, la región de América pantropical aportó el 8.46% de la producción mundial (OIRSA, 2019). Esta información puede ser empleada para la estimación del riesgo fitosanitario causado por el hombre mediante el movimiento de productos agrícolas a nivel global denominado PDE.

El objetivo de este capítulo fue caracterizar las áreas potenciales bajo algún nivel de Riesgo Fitosanitario de *Fusarium oxysporum*, f. sp. *cupense* raza 4 tropical (RF_FocR4T), para identificar posibles escenarios de introducción y establecimiento del patógeno a escala global con énfasis en América pantropical, lo cual se sustentó en los objetivos específicos: 1) modelar el nicho ecológico del patógeno/hospedante, 2) estimar el PDE, y de manera conjunta 3) estimar el RF_FocR4T a través de la MCDA a diferentes escalas.

4.2 Materiales y métodos

La aptitud climática del patógeno/hospedante (ACP y ACH, respectivamente) se estimó a través del modelo de Máxima Entropía que incorpora los datos de presencia (Phillips *et al.*, 2006). Su fundamento radica a partir de un vector z de componentes $\{f_j\}$ donde $j=1, \dots, n$ son los valores correspondientes a las variables ambientales y $x(z)$ es un elemento con condiciones ambientales z en la ubicación x . La probabilidad de sólo presencia $Pr(y=1 | x(z))$ toma la forma de una regresión logística con la interceptada estimada por la entropía de q_i , en función de los valores de las variables ambientales z en una determinada ubicación x (Phillips y Dudik, 2008):

$$Pr(y = 1 | x(z)) = \frac{e^H \cdot q_\lambda(x(z))}{1 + e^H \cdot q_\lambda(x(z))}$$

Donde, q_λ es el estimador de Máxima Entropía de la distribución de $Pr(x(z) | y=1)$ dado por la expresión siguiente:

$$q_\lambda = \frac{\exp(\sum_{j=1}^n \lambda_j \cdot f_j(x(z)))}{Z_\lambda}$$

En complemento, $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_n)$ es un vector de ponderaciones de la j -ésima variable ambiental f_j . Mientras que Z_λ es una constante de normalización que asegura que las probabilidades q_λ sumen 1 en el área de estudio. H es la entropía de la función de densidad q_λ y se define por:

$$H = - \sum (q_\lambda(x(z)) \cdot \ln(q_\lambda(x(z))))$$

Se emplearon 54 detecciones del patógeno expresadas en coordenadas geográficas estandarizadas a la proyección Plate Carrée (latitud, longitud), datum WGS84. Tales localizaciones fueron tomadas de artículos científicos correspondientes a tres regiones del mundo descritas en el Cuadro 4.1. En complemento se identificaron 61 localizaciones de hospedantes de importancia económica distribuidas en América pantropical (Cuadro 4.2).

La caracterización del nicho ecológico se realizó mediante la interacción con 19 variables macro ambientales de la base global de WorldClim versión 2.1 (Fick e Hijmans 2017) (Cuadro 3). Lo que permitió establecer límites para una posible propagación futura (Pitt *et al.*, 2009). El porcentaje del tamaño de la muestra de validación (PTMV) se calculó con la fórmula propuesta por Schaafsma y Van Vark (1979), $PTMV = [1+(p-1)^{1/2}]^{-1}$, donde p es el total de variables explicatorias (19), lo que determinó un valor PTMV de 0.19.

El modelo se implementó mediante el uso del software MaxEnt v3.3.3e. El procesamiento se inició con el uso una semilla aleatoria, un PTMV de 19%, y un número de 10,000 “background points” (Lira-Noriega *et al.*, 2018). MaxEnt se ejecutó de forma iterativa y generó 10 modelos de validación, con un modelo final promedio (West *et al.*, 2016). El potencial predictivo del modelo, se evaluó mediante el análisis del área bajo la curva de la característica operativa relativa (AUC, por sus siglas en inglés) (Fielding y Bell, 1997).

La modelación geoespacial del PDE involucró 1) identificar países con producción de plátano durante el periodo de 2013 a 2017, conforme la fracción arancelaria: 0803 (CCI, 2016), 2) intersectar con la base de datos global de EPPO (2020), conforme con la situación fitosanitaria del patógeno, 3) determinar los flujos de comercialización entre nodos (origen vs destino), 4) construir una base de datos espacial para dimensionar la producción de material vegetativo, y con ello 5) crear mapas globales de la trazabilidad espacial de material vegetativo como posible fuente de inóculo.

El planteamiento para la determinación del PDE se sustentó bajo el principio de que, una probable zona fuente de inóculo, puede ser representada por los nodos de origen, respecto a países con los que mantienen relaciones comerciales; ya que, estas interacciones pueden favorecer la dispersión hacia una nueva área o territorio (FAO, 1995).

Cuadro 4.1. Cincuenta y cuatro sitios de presencia de FocR4T usados en la modelación de la ACP.

Detecciones	Área geográfica	Región	Fuente
1	Isla Mayotte	África	Aguayo <i>et al.</i> (2020)
3	Uttar Pradesh, Kushi Nagar y Ambedkar Nagar en India.	Asia	Damodaran <i>et al.</i> (2019)
34	Kalimatan, Borneo, Java, Aceh, Sumatra, Lampug, Papua Nueva Guinea, Salawesi y Tenggara	Sudeste Asiático	Maryani <i>et al.</i> (2019)
2	Llanura costera del Carmelo y Kibbutz Ein Gev, orilla oriental del lago de Galilea en Israel	Medio Oriente	Maymon <i>et al.</i> (2018)
13	Laos, Myanmar, Vietnam y Yunan	Sudeste Asiático	Zheng <i>et al.</i> (2018)
1	Valle del Jordán	Medio Oriente	García-Bastidas <i>et al.</i> (2014)

El RF_FocR4T en América pantropical se estimó mediante la asociación espacial de la ACP, la ACH y el PDE. Esta metodología involucró un proceso de estandarización mediante un procedimiento de membresía difusa para homogenizar a un mismo rango “0.0 a 1.0” (Cuadro 4). Posteriormente, se combinaron los criterios asignándoles la misma importancia a través de una fórmula de combinación lineal ponderada, para de esta manera obtener una estimación del RF_FocR4T, el cual fue reclasificado en cinco rangos: muy bajo (< 0.15), bajo (0.15-0.30), medio (0.30-0.50), alto (0.50-0.70), muy alto (>0.70).

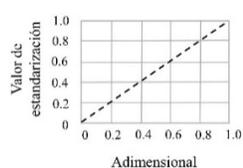
Cuadro 4.2. 61 Sitios de presencia del hospedante, empleados en la modelación de la ACH.

Detecciones	Área geográfica	Fuente
15	Zona de producción de banano en Colombia, Venezuela y Brasil	Corbi <i>et al.</i> (2013) (7 sitios) y De la Pava <i>et al.</i> (2020) (8 sitios).
8	Zona de la producción de banano en Norte y Centro América	Smith <i>et al.</i> (2010) (1 sitio), Ramos-Hernández <i>et al.</i> (2011) (1 sitio), Arendt <i>et al.</i> (2012) (5 sitios), Rivera Rivas <i>et al.</i> (2015) (1 sitio), Sol-Sánchez <i>et al.</i> (2016) (1 sitio).
38	Sitios de producción de banano del país con mayor riesgo conforme al modelo de PDE.	Elbehri <i>et al.</i> (2015) (34 sitios), Cedeño-García-Bastidas <i>et al.</i> (2014) (4 sitios).

Cuadro 4.3. Variables bioclimáticas empleadas en la modelación de nicho ecológico.

Grupo	Variable	Descripción	Unidad de medida
Temperatura	BIO1	Temperatura media anual	° C
	BIO2	Rango diurno medio	° C
	BIO3	Isotermalidad (BIO2/BIO7)*(100)	Adimensional
	BIO4	Estacionalidad de la temperatura (desv. estándar * 100)	%
	BIO5	Temperatura máxima del mes más cálido	° C
	BIO6	Temperatura mínima del mes más frío	° C
	BIO7	Rango anual de temperatura (BIO5-BIO6)	° C
	BIO8	Temperatura media del trimestre más húmedo	° C
	BIO9	Temperatura media del trimestre más seco	° C
	BIO10	Temperatura media del trimestre más cálido	° C
	BIO11	Temperatura media del trimestre más frío	° C
Precipitación	BIO12	Precipitación anual	mm
	BIO13	Precipitación del mes más húmedo	mm
	BIO14	Precipitación del mes más seco	mm
	BIO15	Estacionalidad de la precipitación (coef. de variación)	mm
	BIO16	Precipitación del trimestre más húmedo	%
	BIO17	Precipitación del trimestre más seco	mm
	BIO18	Precipitación del trimestre más cálido	mm
	BIO19	Precipitación del trimestre más frío	mm

Cuadro 4.4. Criterios empleados en la MCDA del RF_FocR4T.

No	Criterio	Descripción	Unidades	Rango	Membresía difusa
1	ACP	Ambiente favorable para la ocurrencia de FocR4T	adimensional	0-1	 <p>(CLP: 0.0-1.0)</p>
2	ACH	Ambiente favorable para el establecimiento del hospedante	adimensional	0-1	
3	PDE	Flujos de material vegetativo	ton/año	31-3,353,600	

Para evaluar la relación estadística existente entre las variables explicatorias y el RF_FocR4T, se empleó la *Correlación de Pearson* para determinar el signo y magnitud de la tendencia entre los valores estimados de RF_FocR4T y las variables bioclimáticas con mayor valor de importancia que determinaron el modelo resultante.

4.3 Resultados y discusión

La ACP determinó que existen condiciones ambientales que favorecen al patógeno en cuatro regiones a nivel global: 1) Sureste de Asia (región insular), 2) Asia meridional, 3) África Central y Madagascar) y 4) Sudamérica y con porciones diversas en Centro y Norte América (Figura 4.1 superior).

El grado de contribución a la variabilidad espacial de la posible distribución del patógeno se logró definir por las variables de precipitación del trimestre más húmedo (BIO16, 33%) y estacionalidad de la temperatura (BIO4, 29.3%). Mientras que la contribución que tendría la variable explicatoria si se empleara sola (importancia de permutación), fue liderada por la temperatura media anual (BIO1) y la temperatura media del trimestre más seco (BIO9) con 59.1 % y 11.6 %, respectivamente. Se obtuvo un buen desempeño predictivo con un área bajo la curva de 0.975 (Cuadro 4.5).

En complemento, los lugares que presentan condiciones ambientales que favorecen la ACH (plátano) se distribuyen en centro norte de Sudamérica, en países como Brasil, Perú, Ecuador y Colombia (Figura 4.1 inferior). La contribución porcentual se definió por el rango anual de temperatura (BIO7, 38.6%) y la estacionalidad de la temperatura (BIO4, 15.7%). Sin embargo, la importancia de permutación fue por la estacionalidad de la temperatura (BIO4), con un valor de 63.8%; lo cual se respaldó con un valor de 0.978 (Cuadro 4.5).

Cuadro 4.5. Contribución porcentual e importancia de permutación de las variables empleadas en la modelación de Máxima Entropía del nicho ecológico del patógeno y hospedante.

Grupo	Variable	ACP (FocR4T)		ACH (Plátano o Banano)	
		Contribución Porcentual (%)	Importancia de Permutación (%)	Contribución Porcentual (%)	Importancia de Permutación (%)
Temperatura	BIO1	4.4	59.1	3.7	1.1
	BIO2	0.3	5	6.2	1.4
	BIO3	0.1	-	6.4	1.4
	BIO4	29.3	1.7	15.7	63.8
	BIO5	-	-	2.7	0.2
	BIO6	11.3	0.7	5.7	0.2
	BIO7	1	0.1	38.6	0.2
	BIO8	0.1	-	0.6	5.9
	BIO9	3.4	11.6	-	-
	BIO10	0.1	2.6	4.7	0.5
	BIO11	0.4	1.6	3.3	1.2
Precipitación	BIO12	-	-	-	-
	BIO13	-	-	0.3	3
	BIO14	2.7	0.1	4.5	8.8
	BIO15	2.5	7.8	5.3	9.2
	BIO16	33	0.2	1.7	0.8
	BIO17	-	-	0.1	0.7
	BIO18	10.3	6.8	0.2	0.6
	BIO19	1.2	2.6	0.4	1.1

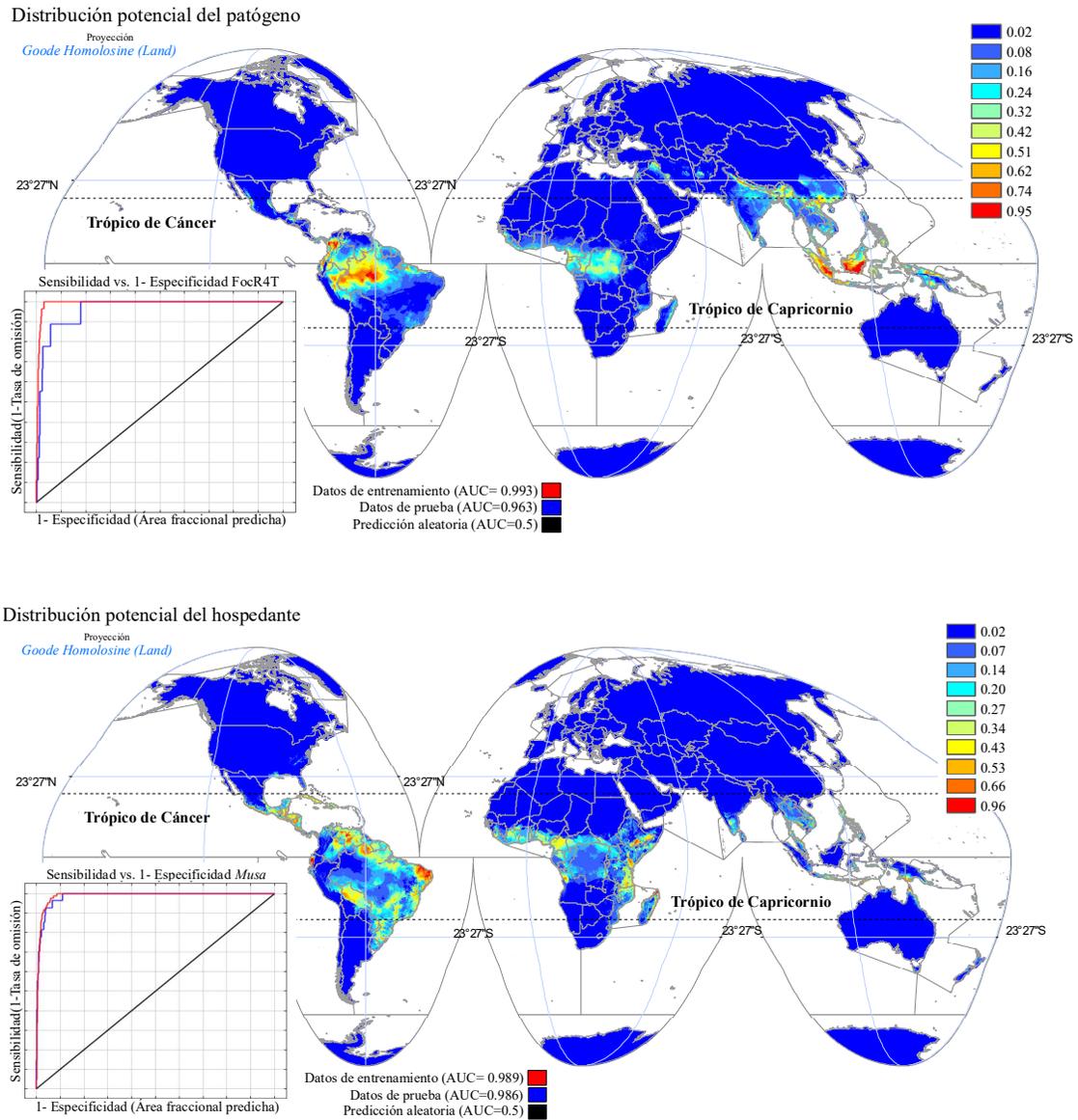


Figura 4.1. Modelo de Máxima Entropía. Aptitud climática del Patógeno (superior) y Aptitud Climática del Hospedante (inferior).

Los países que presentan riesgo antrópico por PDE, se distribuyen en tres continentes (América, Asia y África). La dinámica de la movilización de los productos del género *Musa spp* ocurrida en el periodo de estudio, fue de 5,289,427 toneladas hacia 35 países. El PDE se agrupó en: a) los grandes exportadores como China (87.7 %), Hong Kong (6.4 %), Jordania (4.0 %) y Malasia (1.7 %) y, b) los pequeños exportadores que incluyeron Pakistán, Australia, Mozambique y Filipinas que en conjunto aportaron menos del 1 % del total (Figura 4.2).

El mayor flujo por volumen se destacó en seis nodos destino: Filipinas (67.1%), Ecuador (17.9%), Myanmar (5.1%), Tailandia (2.9%), Vietnam (2.2%), Sudán (1.31%). Para el caso del continente americano, los nodos destino con mayor volumen fueron Ecuador (17.9%), Costa Rica

(0.4%), México (<0.1%, 1,082 t), Colombia (<0.1%, 473 t), Estados Unidos (<0.1%, 98 t), Guatemala (<0.1%, 92 t) y Chile (<0.1%, 29 t) (Figura 4.2).

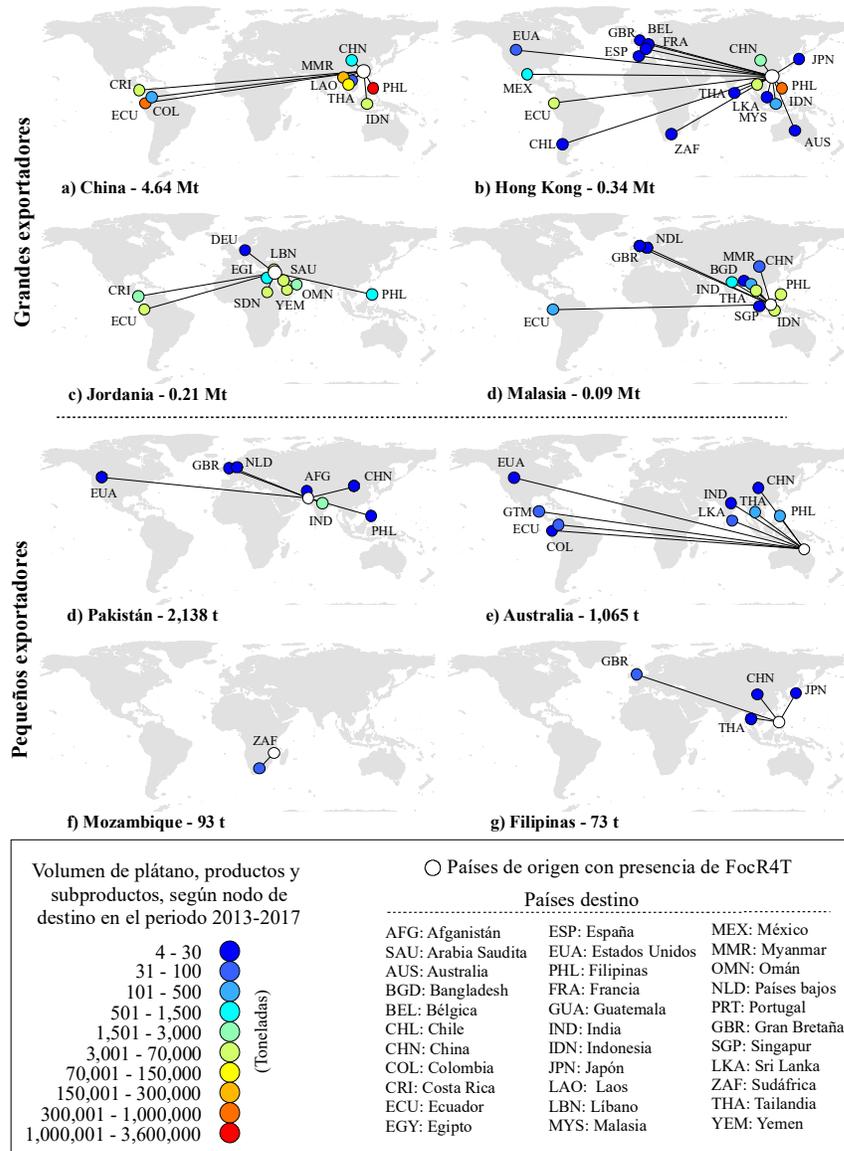


Figura 4.2. Modelo de PDE por movilidad de material vegetativo (género *Musa*).

A nivel global, se identificaron cuatro áreas focales con diferentes niveles de RF FocR4T; cabe señalar que dentro de ellas se identificó una superficie prioritaria de 29,567 km² en riesgo fitosanitario muy alto (> 0.9). Geográficamente, se distribuyen en territorios que abarcan cuatro grandes extensiones integradas de la siguiente forma: a) en el Sudeste Asiático, una extensión de 2,366.4 km² (8.015%) distribuido en Indonesia, Tailandia, Camboya, Malasia, Filipinas, Timor Leste y el norte de Australia, b) el Sureste de África una superficie de 434.06 km² (1.46 %), distribuida en Madagascar, Mozambique, Malawi y Kenia, c) en África Occidental 7.56 km² (0.025 %), en la región de Liberia y d) la región pantropical de América de mayor extensión con 26,758.9 km² (90.5%), que se distribuye en Perú, Guyana, Ecuador, México, Panamá, Venezuela, Colombia, Guatemala y Brasil (Figura 4.3).

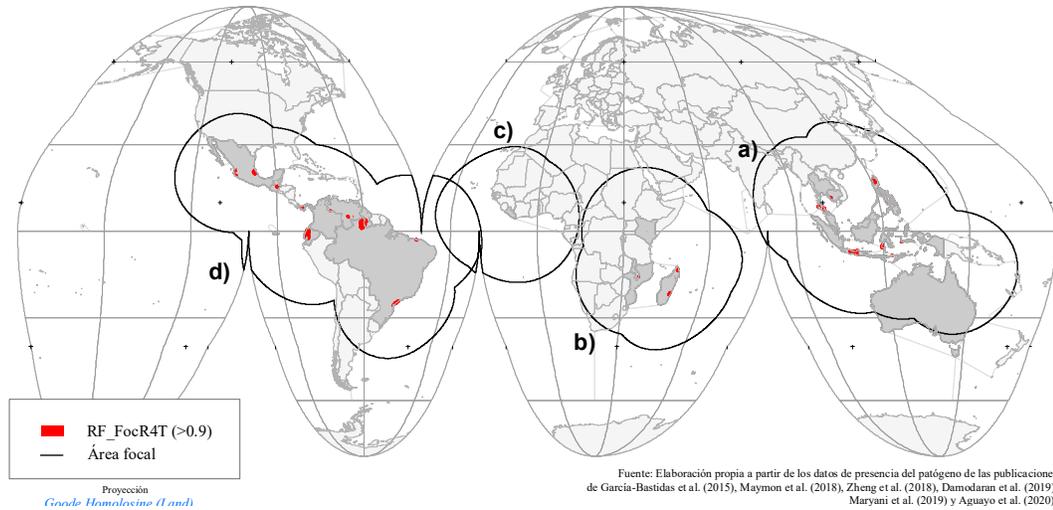


Figura 4.3. Áreas focales y superficies prioritarias en RF_FocR4T muy alto en el mundo (> 0.9).

A escala subcontinental, en la región pantropical de América (Figura 4.4) se identificaron 15.8 millones de km² con algún nivel de RF_FocR4T, lo cual se refleja en el Cuadro 6 en el que se puede observar la superficie estimada por nivel de RF_FocR4T en los 45 países identificados.

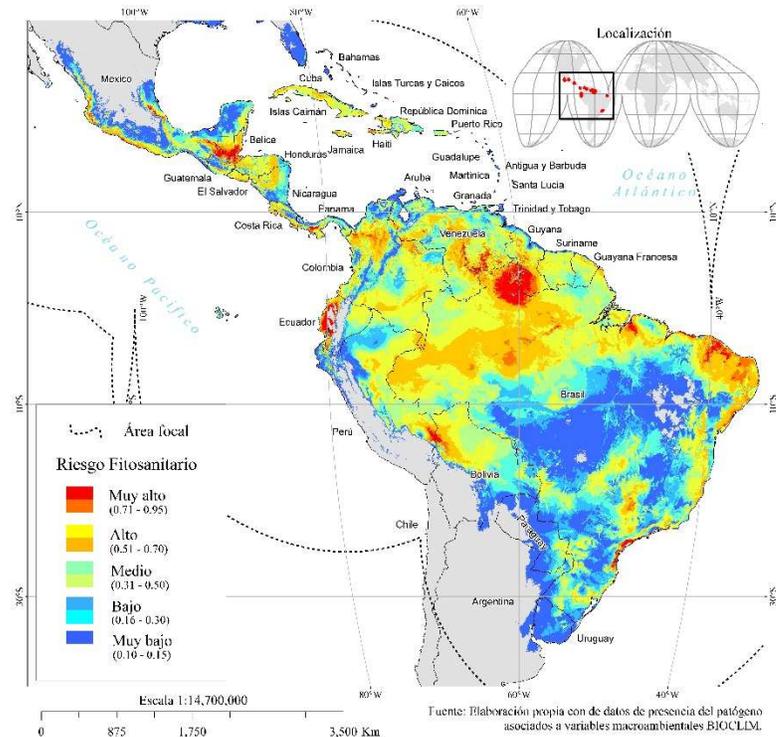


Figura 4.4. Distribución espacial del RF_FocR4T en América pantropical.

Cuadro 4.6. Niveles de RF_FocR4T localizados en América pantropical.

Región	País	Porcentaje del área total identificada por país con algún nivel de riesgo fitosanitario (%)									Total del área con algún nivel de riesgo (km ²)	% del área total dentro de América pantropical
		<0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	<1		
Norte	México	41.23	11.58	11.18	9.83	14.52	7.57	2.17	1.78	0.15	806,547.62	5.09
	Estados Unidos	88.30	6.20	2.74	1.18	1.54	0.05				262,842.37	1.66
Subtotal											1,069,389.99	6.75
Centro	Nicaragua	12.74	17.14	20.72	11.63	15.72	21.73	0.31			133,151.46	0.84
	Honduras	2.50	7.37	11.87	7.51	42.24	27.98	0.54			118,940.12	0.75
	Guatemala	14.07	7.45	5.36	6.57	21.00	19.96	10.21	14.67	0.72	116,696.91	0.74
	Panamá	14.99	11.49	15.95	18.08	18.36	12.25	4.20	4.66	0.03	73,915.26	0.47
	Costa Rica	18.42	8.72	6.27	5.02	25.67	35.49	0.37	0.03		51,632.69	0.33
	Belice	0.53	0.98	1.96	1.79	21.10	44.56	12.08	16.99		23,671.45	0.15
	El Salvador	1.65	1.12	2.15	1.97	57.41	35.58	0.12			21,710.71	0.14
Subtotal											539,718.61	3.41
Sur	Brasil	20.39	13.02	12.60	14.15	20.82	15.29	2.00	1.67	0.06	8,808,039.49	55.58
	Colombia	7.84	7.32	10.01	14.41	42.00	15.84	2.34	0.23	0.00	1,136,725.73	7.17
	Venezuela	6.01	6.14	13.59	21.12	29.28	18.49	3.39	1.97	0.00	919,696.09	5.80
	Bolivia	13.84	7.30	17.09	24.42	28.03	7.49	1.27	0.56		845,814.43	5.34
	Perú	16.13	12.72	10.03	19.97	31.75	7.90	0.82	0.67		839,690.29	5.30
	Paraguay	64.62	16.16	8.13	6.00	4.98	0.12	0.00	0.00		334,011.68	2.11
	Uruguay	75.11	17.24	3.90	3.52	0.23					243,178.38	1.53
	Argentina	77.03	8.86	4.93	5.22	3.87	0.08				214,547.26	1.35
	Guyana	4.01	3.09	4.09	8.75	32.16	21.36	11.42	14.64	0.47	211,818.62	1.34
	Ecuador	10.69	5.91	11.07	12.85	24.48	8.43	5.41	12.47	8.68	206,362.40	1.30
	Suriname	2.47	0.74	8.33	29.30	55.32	3.83	0.01			145,688.92	0.92
	Guayana Francesa	0.91	2.15	20.54	23.35	45.63	7.18	0.23	0.01		83,701.95	0.53
	Chile	100.00									275.22	0.00
Subtotal											13,989,550.46	88.27

Región	País	Porcentaje del área total identificada por país con algún nivel de riesgo fitosanitario (%)									Total del área con algún nivel de riesgo (km ²)	% del área total dentro de América pantropical
		<0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	<1		
Caribe	Cuba	4.27	1.56	1.63	17.37	60.65	14.04	0.49			123,628.39	0.78
	República Dominicana	6.03	5.78	21.71	27.76	37.68	1.04				50,434.01	0.32
	Haití	3.18	1.10	2.80	16.34	42.74	28.53	3.91	1.41		29,355.49	0.19
	Bahamas	93.62	5.19	0.35		0.84					12,660.57	0.08
	Jamaica	12.57	5.45	5.74	5.63	43.31	24.66	2.64			11,849.82	0.07
	Puerto Rico	2.31	4.43	19.88	32.00	41.39					9,672.60	0.06
	Trinidad y Tobago	80.29	7.00	4.56	2.01	6.14					5,052.35	0.03
	Guadalupe	88.91	11.09								1,671.15	0.01
	Martinica	75.29	24.22	0.49							1,102.69	0.01
	Dominica	42.40	56.48	1.12							773.23	0.005
	Santa Lucía	60.39	37.80	1.81							635.80	0.004
	Antigua y Barbuda	100.00									448.24	0.003
	Barbados	100.00									444.92	0.003
	San Vicente y las Granadinas	60.52	37.36	1.88		0.24					344.96	0.002
	Granada	86.00	14.00								320.93	0.002
	Islas Turcas y Caicos	60.40	39.60								298.49	0.002
	Islas Virgen	98.23	1.77								283.92	0.002
	Antillas Holandesas	100.00									277.93	0.002
	Islas Caimán	100.00									185.43	0.001
	San Cristobal y Nieves	91.96	8.04								167.75	0.001
Montserrat	84.36	10.64	5.00							107.13	0.001	
Islas Vírgenes Británicas	95.68	4.32								84.08	0.001	
Anguilla	100.00									64.61	0.0004	
249,864.45											1.58	
Total general		3,446,422	1,763,995	1,863,222	2,301,315	3,724,171	2,123,246	325,532	274,023	26,599	15,848,524	100.00

Con mayor detalle en la Figura 4.5, se observan las regiones prioritarias territorialmente ubicadas en: a) la porción centro-sur y costa del océano pacífico en México, b) el centro-norte de Guatemala, sur de Belice y este de Chiapas en México, c) el centro norte de Colombia y porción central de Panamá, d) la costa de Ecuador, e) noroeste de Brasil, sur de Guyana y una porción del centro de Venezuela, f) la región noreste de Brasil, g) una región colindante entre Perú y Bolivia, y h) una porción en la región del sureste de Brasil. Esto sugiere que son áreas estratégicas donde se deben intensificar las acciones preventivas como exploración, monitoreo y vigilancia epidemiológica fitosanitaria.

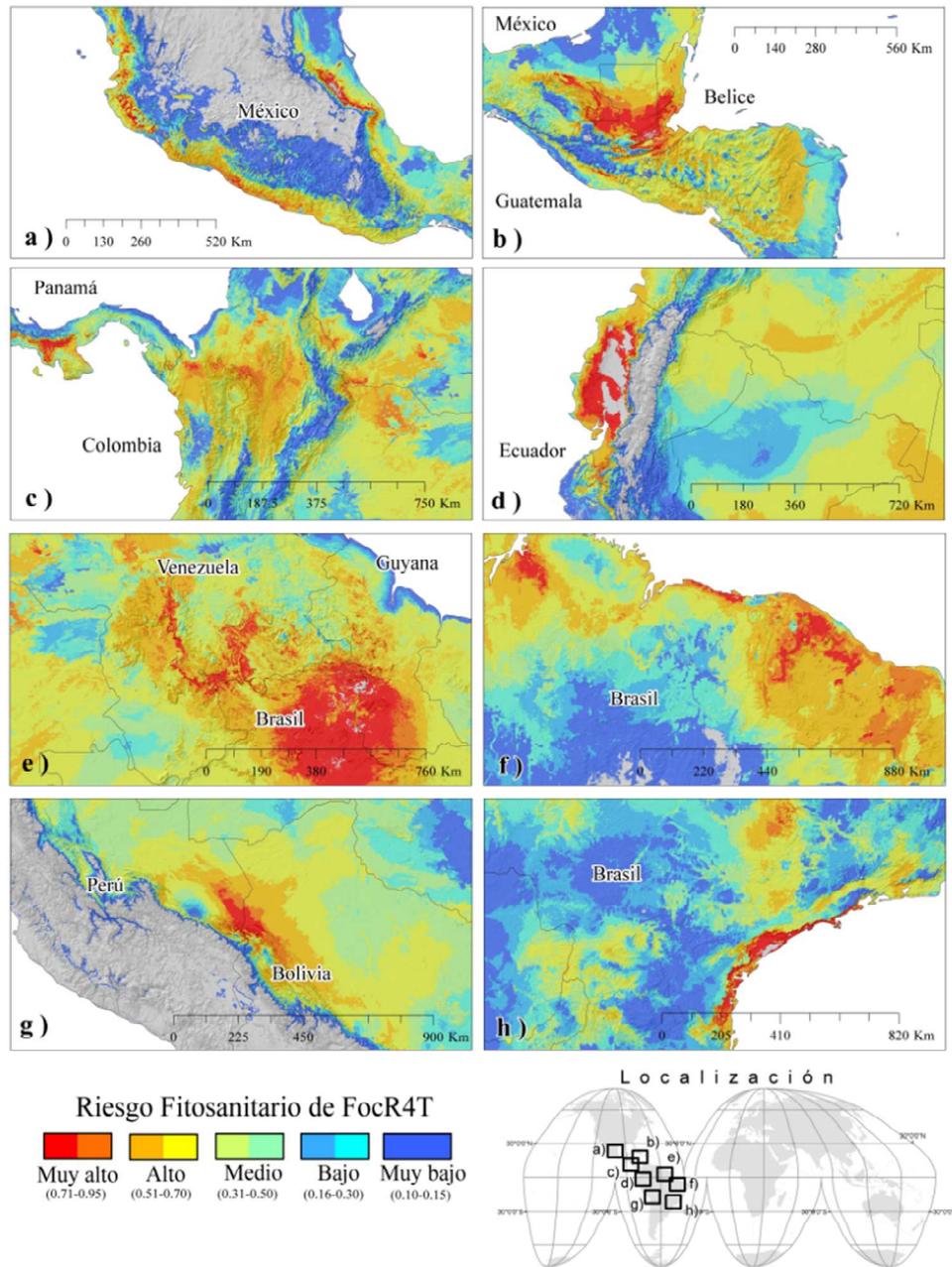


Figura 4.5. Regiones prioritarias con mayor RF_FocR4T en América pantropical.

El análisis de correlación de Pearson reveló que las variables (BIO16, BIO6 y BIO18) presentan una correlación positiva, es decir, los valores más altos en las zonas cercanas a los trópicos corresponden a los valores más altos de RF_FocR4T. Cabe señalar que la estacionalidad de la temperatura (BIO4) presentó una correlación negativa contra la distribución espacial del RF_FocR4T, con valores mínimos en la zona cercana al Ecuador (Cuadro 4.7).

Cuadro 4.7. Correlación de Pearson (r) entre el RF_FocR4T) contra las variables bioclimáticas de mayor contribución porcentual.

	RF_FocR4T	BIO16	BIO14	BIO6	BIO18
RF_FocR4T	1				
BIO16	0.32	1			
BIO14	-0.25	-0.41	1		
BIO6	0.34	0.43	-0.68	1	
BIO18	0.07	0.39	0.08	-0.22	1

BIO16: precipitación del trimestre más húmedo, BIO4: estacionalidad de la temperatura, BIO6: la temperatura mínima del mes más frío y BIO18: precipitación del trimestre más cálido.

Lo anterior revela que la tendencia de la predicción del riesgo fitosanitario de la Fusariosis de la musáceas es hacia las zonas más cercanas al Ecuador por presentar una mayor precipitación del trimestre más húmedo, una mayor temperatura mínima del mes más frío, una mayor precipitación del trimestre más cálido, así como una menor estacionalidad de la temperatura. Es decir, los lugares cercanos hacia el ecuador presentan las mejores condiciones para el desarrollo de la enfermedad, sin restarle la importancia a las zonas con menor nivel de riesgo distribuidas en América pantropical, visibles en la Figura 4.5.

Los periodos de precipitación con más humedad y más cálidos, con una temperatura más fría favorecen de manera positiva a las condiciones óptimas para FocR4T, y permiten caracterizar superficies que cuentan las condiciones óptimas en regiones próximas al ecuador. Por ello se identificaron porciones compactas con la condición de riesgo fitosanitario muy alto en países como Brasil, Venezuela, Guyana, Colombia y Ecuador. Sin embargo, la estacionalidad de la temperatura se correlacionó en sentido inverso con una tendencia negativa ($r = 0.28$); es decir, a menor variabilidad térmica se estima un mayor RF. Lo anterior revela que la temperatura juega un papel importante en el desarrollo de la enfermedad.

Los resultados obtenidos indican que la posible ocurrencia de FocR4T está muy relacionada a condiciones de menor variabilidad climática territorialmente en superficies próximos al Ecuador, ya que la severidad del marchitamiento por *Fusarium spp* se incrementa en relación con la precipitación y la temperatura (Peng *et al.*, 1999). Incluso ante el efecto del cambio climático factores como baja en la precipitación en periodos de mayor humedad y altas precipitaciones en periodos más cálidos generan mayor probabilidad de ocurrencia del patógeno (i.e.) concluyen que para 2050, hasta un 91% de áreas aptas para cultivo de banano en Filipinas estarán infestadas de FocR4T (Salvación *et al.* 2019a; 2019b).

Las ONPF y las ORPF que integran América pantropical pueden apoyarse en el modelo cartográfico de RF_FocR4T, como insumos de respaldo en el manejo del patógeno, ante una posible introducción, establecimiento o dispersión entre los países que integran las organizaciones. Se puede considerar un insumo técnico/científico para dar soporte en la toma de decisiones en el proceso de vigilancia epidemiológica fitosanitaria como complemento de los programas de manejo integrado de plagas y enfermedades (Siamak *et al.*, 2018; Thangavelu *et al.*, 2020). Este tipo de modelado se concibe como una estrategia preventiva ante el riesgo fitosanitario de la Fusariosis de las musáceas en diferentes escalas geográficas.

Los organismos de protección fitosanitaria, tanto regionales como nacionales, (ONPF y ORPF), se deben coordinar con los centros de investigación para la elaboración de manera conjunta de modelos de riesgo fitosanitario más completos que puedan fortalecer las acciones y estrategias operativas, entre las que destacan la identificación de sitios o áreas óptimas para realizar actividades de exploración, el diseño de rutas de trampeo y vigilancia, así como el establecimiento de parcelas centinelas y viveros trampa (Pérez-Vicente, 2014; SENASICA, 2019).

Como investigación a futuro, se recomienda realizar trabajos a mayor resolución espacial con la incorporación del factor suelo como elemento clave en la propagación de cepas patogénicas (Orr y Nelson, 2018). Para ello se puede considerar el uso de modelos digitales de elevación que abarquen las zonas productoras de plátano, incorporar la geometría de la red hidrográfica (análisis de afluentes), así como el riesgo potencial de inundación, hacia las áreas plataneras o bananeras que se encuentren en las partes bajas de la cuenca en un contexto de análisis de conectividad y dinámica de parches de campos plataneros.

4.4. Conclusión

La totalidad de la región de América pantropical presentó un algún nivel de RF_FocR4T. Sin embargo, se delimitaron de manera específica seis áreas compactas distribuidas en Norteamérica, Centroamérica, Sudamérica y el Caribe. Los países en orden de potencial de afectación en Sudamérica son Brasil, Colombia, Venezuela y Perú, entre otros; para el caso de Centroamérica son Nicaragua, Honduras, Guatemala y Panamá entre otros; para el Caribe sería Cuba, República Dominicana, Haití, Bahamas, Jamaica, entre otros; y, para Norteamérica, sólo sería México el país con posibles afectaciones.

Una fortaleza del modelo geoespacial de RF_FocR4T desarrollado en la presente investigación es que puede ser actualizado con nuevas detecciones del patógeno provenientes de fuentes oficiales o literatura científica, así como de datos recientes de movilidad de material vegetal propagativo, lo que permitiría obtener un replanteamiento del escenario actual, ajustado a la realidad epidémica de la enfermedad. Sin embargo, es recomendable profundizar en las posibles consecuencias de FocR4T en América pantropical ante el inminente cambio climático.

4.5. Literatura citada

- Dita, M., Barquero, M., Heck, D., Mizubuti, S.G.E. and Staver, P.C. (2018). Fusarium Wilt of Banana: Current Knowledge on Epidemiology and Research Needs toward Sustainable Disease Management. *Frontiers in Plant Science*, 9(4):1468.
- Donatelli, M., Magarey, R.D., Bregaglio, S., Willocquet, L., Whish, J.P.M. and Savary, S. (2017). Modelling the impacts of pests and diseases on agricultural systems. *Agricultural Systems*. 155:213–224.

- Dyer, E.E., Cassey, P., Redding, D.W., Collen, B., Frank, V., Gaston, K.J., Jones, E.K., Kark, S., Orme, L.C.D. and Blackburn, M.T. (2017). The global distribution and drivers of alien bird species richness. *PLoS Biology*. 15(1):e2000942.
- FAO. (1995). Directrices para la exportación, el envío, la importación y liberación de agentes de control biológico y otros organismos benéficos. NIMF No 3. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Convención Internacional de Protección Fitosanitaria. Consultada: 13 de agosto de 2021. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-j5365s.pdf>
- Fick, S.E. and Hijmans, R.J. (2017). Worldclim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*. 37:4302–4315.
- Fielding, A. H. and Bell, J. F. (1997). A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental Conservation*. 24(1):38–49.
- Lira-Noriega, A., Soberón, J. and Equihua, J. (2018). Potential invasion of exotic ambrosia beetles *Xyleborus glabratus* and *Euwallacea* sp in Mexico: a major threat for native and cultivated forest ecosystems. *Scientific Reports*. 8:10179.
- OIRSA. (2019). Análisis de Riesgo *Fusarium oxysporum*, f. sp. *cubense* raza 4 Tropical (Foc R4T). Organismo Internacional Regional de Sanidad Agropecuaria. Consultado: 4 de noviembre de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3keq33L>
- Orr, R. and Nelson, P. (2018). Impacts of soil abiotic attributes on Fusarium wilt, focusing on bananas. *Applied Soil Ecology*. 132:20–33.
- Peng, H.X., Sivasithamparam, K. and Turner, D.W. (1999). Chlamydospore germination and Fusarium wilt of banana plantlets in suppressive and conducive soils are affected by physical and chemical factors. *Soil Biology and Biochemistry*. 31(10):1363–1374.
- Pérez-Vicente, L., Dita, R.M.A. and Martínez- De La Parte, E. (2014). Technical Manual Prevention and diagnostic of Fusarium Wilt (Panama disease) of banana caused by *Fusarium oxysporum*, f. sp. *cubense* Tropical Race 4 (TR4). Consultado: 5 de abril de 2021. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-br126e.pdf>.
- Phillips, S.J., Anderson, R.P. and Schapire, R.E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modeling*. 190(3):231–259.
- Phillips, S.J. and Dudík, M. (2008). Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*. 31(2):161–175.
- Pitt, J.P.W., Worner, S.P. and Suarez, A.V. (2009). Predicting Argentine ant spread over the heterogeneous landscape using a spatially explicit stochastic model. *Ecological Applications*. 19(5):1176–1186.
- Salvación, A.R., Solpot, T.C., Cumagun, C.J.R., Pangga, I.B., Magcale-Macandog, D.B., Sta. Cruz, P.C., Saludes, R.B. and Aguilar, E.A. (2019a). Exploring environmental determinants of Fusarium wilt occurrence on banana in South Central Mindanao, Philippines. *Plant Protection Journal*. 12(2):78–90.
- Salvación, A.R., Cumagun, C.J.R., Pangga, I.B., Magcale-Macandog, D.B., Sta Cruz, P. Saludes, R.B., Solpot, T.C. and Aguilar, E.A. (2019b). Banana suitability and Fusarium wilt distribution in the Philippines under climate change. *Spatial Information Research*. 27:339–349.
- Schaafsma, W. & Van Vark, G.N. (1979). Classification and discrimination problems with applications. *Statistica Neerlandica*. 33(2):91–126.
- SENASICA. (2019). Manual Técnico Operativo. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Servicio Nacional de Inocuidad y Calidad Alimentaria. CNRF-PVEF. Consultado: 28 de abril de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/35KO8K9>

- Siamak, S.B. and Zheng, S. (2018). Banana fusarium wilt (*Fusarium oxysporum*, f. sp. *cubense*) control and resistance, in the context of developing wilt-resistant bananas within sustainable production systems. *Horticultural Plant Journal*. 4(5):208–218.
- Thangavelu R., Raj, E.E., Pushpakanth, P., Loganathan, M. and Uma, S. (2020). Draft genome of *Fusarium oxysporum*, f. sp. *cubense* strain Tropical Race-4 infecting Cavendish (AAA) group of banana in India. *Plant Disease*. 105:481–483.
- Tuomola J., Yemshanov D., Huitu H. and Hannunen S. (2018). Mapping risks of pest invasions based on the spatio-temporal distribution of hosts. *Management of Biological Invasions*. 9(2):115–126.
- West, A.M., Kumar, S., Brown C.S., Stohlgren, T.J. and Bromberg, J. (2016). Field validation of an invasive species Maxent model. *Ecological Informatics*. 36:126–134.

4.6. Fuente de datos

- Aguayo, J., Cerf, I., Folscher, A.B., Fourrier-Jeandel, C., Ioos, R., Matthews, M.C., Mostert, D., Renault, R., Wilson, V. and Viljoen, A. (2020). First report of *Fusarium oxysporum*, f. sp. *cubense* tropical race 4 (TR4) causing banana wilt in the Island of Mayotte. *Plant Disease*. 105:219.
- Arendt, W.J., Tórrez, M. and Vilchez, S. (2012). Diversidad de aves en agropaisajes en la región norte de nicaragua. *Ornithology Neotropical*. 23:113–131.
- CCI. (2016). Centro de Comercio Internacional. International Trade Statistics. Consultado: 28 de febrero de 2021. Disponible en Internet: <https://bit.ly/2EMlsqQ>
- Cedeño-García, G., Soplín-Villacorta, H., Helfgott-Lerner, S., Cedeño-García, G. and Sotomayor-Herrera, I. (2016). Aplicación de biorreguladores para la macro-propagación del banano cv. Williams en cámara térmica. *Agromonía Mesoamericana*. 27(2):397–408.
- Corbi, J.J., Kleine, P., Trivinho Strixino, S. and Dos Santos, E.A. (2013). Diagnóstico ambiental de metais no sedimento de córregos adjacentes a áreas de cultivo de banana (*Musa spp.*) no estado de São Paulo, Brasil. *Eclética Química*. 38:136–146.
- Damodaran, Y., Mishra, V. K., Jha, S. K., Gopal, R., Rajan, S. and Ahmed, I. (2019). First report of fusarium wilt in banana caused by *Fusarium oxysporum*, f. sp. *cubense* Tropical Race 4 in India. *Plant Disease*. 103(5):1022–1023.
- De la Pava, N., García, M.A., Brochero, C.E. and Sepúlveda-Cano, P.A. (2020). Records of *Dryophthorinae* (Coleoptera: Curculionidae) on Colombian Caribbean coast. *Acta Biológica Colombiana*. 25(1):96–103.
- Elbehri, A., Calberto, G., Staver, C., Hospido, A., Roibas, L., Skully, D., Siles, P., Arguello, J., Sotomayor, I. y Bustamante, A. (2015). Cambio climático y sostenibilidad del banano en el Ecuador: Evaluación de impacto y directrices de política. (FAO), Roma, Italia. Consultado: 18 de abril de 2021. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i5116s.pdf>
- EPPO. (2020). Database Panama disease. European and Mediterranean Plant Protection Organization. Consultado: 20 de mayo de 2021. Disponible en: <https://gd.eppo.int/taxon/FUSAC4/distribution/CO>
- García-Bastidas, F., Ordoñez, N., Konkol, J., Al-Qasim, M., Naser, M., Abdelwali, N., Salem, C., Waalkijh, C., Ploetz, R.C. and Kema, G.H.J. (2014). First Report of *Fusarium oxysporum*, f. sp. *cubense* Tropical Race 4 associated with Panama Disease of banana outside Southeast Asia. *Plant Disease*. 98(5):694–694.
- Maryani, N., Lombard, L., Poerba, Y.S., Subandiyah, S., Crous, P.W. and Kema, G.H.J. (2019). Phylogeny and genetic diversity of the banana Fusarium wilt pathogen *Fusarium*

- oxysporum*, f. sp. *cubense* in the Indonesian centre of origin. *Studies in Mycology*. 92:155–194.
- Maymon, M., Shpatz, U., Harel, Y.M., Levy, E., Elkind, G., Teverovsky, E., Gofman, R., Haberman, A., Zemorski, R., Ezra, N., Levi, Y., Or, G., Galpaz, N., Israeli, Y. and Freeman, S. (2018). First report of *Fusarium oxysporum*, f. sp. *cubense* Tropical Race 4 causing fusarium wilt of Cavendish bananas in Israel. *Plant Disease*. 102(12):2655-2656.
- Ramos-Hernández, E., Sol-Sánchez, A., Guerrero-Peña, A., Obrador-Olán, J. y Carrillo-Ávila, E. (2011). Efecto de *Arachis pintoii* sobre las arvenses asociadas al plátano macho (*Musa aab*), Cárdenas, Tabasco, México. *Agronomía Mesoamericana*. 22(1):61–62.
- Rivera-Rivas, R., Vaca-Suárez, S. and Aguilar-Bustamante, V. (2015). Agronomic performance of banana plantain (*Musa paradisiaca* L.) cv. CEMSA ¾ by selecting corms based on productivity Potosí, Rivas. *La Calera*. 18(30):29–32.
- Smith, E., Velásquez, M., Zúñiga, L. y Valerín, J. (2010). Efecto de la densidad de población sobre el crecimiento y producción de plantas en primera generación de banano dátil (*Musa AA*). *Agronomía Costarricense*. 34 (1):77–83.
- Sol-Sánchez, A., Gómez-García, E., García-López, E. & Pérez-Vázquez, A. (2016). Flora útil en el Ejido Sinaloa 1a sección, Cárdenas, Tabasco, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 7(14):2671–2681.
- Zheng, S.J., García-Bastidas, F.A., Li, X., Zeng, L., Bai, T., Xu, S., Yin, K., Li, H., Fu, G., Yu, Y., Yang, L., Nguyen, H.C., Douangboupha, B., Khaing, A.A., Drenth, A., Seidi, M.F., Meijer, H.J.G. and Kema, G.H.J. (2018). New geographical insights of the latest expansion of *Fusarium oxysporum*, f.sp. *cubense* Tropical Race 4 into the greater Mekong Subregion. *Frontier in Plant Science*. 9:457.

CAPÍTULO 5. MAPEO DE UNA POSIBLE AMENAZA PARA EL SECTOR AGRÍCOLA MEXICANO: AVISPÓN GIGANTE ASIÁTICO *Vespa mandarinia* (Smith 1852) (Hymenoptera: Vespidae)⁸

Resumen

El avispon gigante asiático representa una amenaza para el sector agrícola global, ya que, es una especie con un comportamiento depredador e invasor que afecta de manera directa a las abejas melíferas (*Apis mellifera*), principales agentes de polinización de frutales, hortalizas y de la producción de semillas. El objetivo de este capítulo fue elaborar un diagnóstico espacial del riesgo sanitario asociado a *V. mandarinia* por su posible impacto en el sector agroalimentario mexicano. Para ello, se identificaron los cultivos de importancia económica, agrupados por porcentaje de polinización, y la distribución potencial del avispon gigante asiático mediante el modelo de máxima entropía. El modelo cartográfico de riesgo sanitario resultante permitió identificar superficies con diferentes índices de riesgo sanitario (bajo, medio, alto y muy alto), así como la definición de áreas prioritarias representadas espacialmente en cuadrantes y clúster agroalimentarios en riesgo (conglomerados). Estos resultados se presentan como una herramienta geotecnológica que puede fortalecer la planeación de la vigilancia epidemiológica en México, lo que tiene el potencial de coadyuvar en el establecimiento de estrategias preventivas ante el riesgo sanitario que representa *V. mandarinia* para el sector agrícola mexicano.

Palabras clave: *Vespa mandarinia*, polinización, análisis espacial, vigilancia epidemiológica, México.

Abstract

The Asian giant hornet represents a threat to the global agricultural sector, as it is a species with predatory and invasive behavior that directly affects honey bees (*Apis mellifera*), the main pollination agents of fruit trees, vegetables and seed production. The objective of this chapter was to develop a spatial diagnosis of the health risk associated with *V. mandarinia* due to its possible impact on the Mexican agrifood sector. For this purpose, economically important crops were identified, grouped by pollination percentage and the potential distribution of the Asian giant hornet was identified using the maximum entropy model. The resulting health risk cartographic model allowed the identification of areas with different health risk indices (low, medium, high and very high), as well as the definition of priority areas spatially represented in quadrants and agri-food clusters at risk (clusters). These results are presented as a geotechnological tool that can strengthen the planning of epidemiological surveillance in Mexico, which has the potential to contribute to the establishment of preventive strategies to address the health risk posed by *V. mandarinia* to the Mexican agricultural sector.

Keywords: Asian Giant Hornet, pollination, spatial analysis, epidemiological surveillance, Mexico.

5.1. Introducción

México es considerado el principal productor de hortalizas y el segundo en cultivo de frutas en América Latina, sólo por debajo de Brasil (CEDRSSA, 2021). Durante 2019, las actividades agrícolas mexicanas significaron un flujo de inversión extranjera constante por arriba

⁸ ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN PUBLICADO en REVISTA JCR como: Ibarra-Zapata, E., Aguirre-Salado, C.A., Miranda-Aragón, L., Loredó-Osti, C., Escoto-Rodríguez, M. y Ramírez y Ramírez, F. 2022. Mapeo de una posible amenaza para el sector agrícola mexicano: avispon gigante asiático *Vespa mandarinia* (Smith 1852) (Hymenoptera: Vespidae). *Revista de la Sociedad Entomológica Argentina*. 81(1):1-18, 2022. <https://doi.org/10.25085/rsea.810101>.

de los 50 millones de dólares con una participación al producto interno bruto de poco más del 2% (Statista, 2021).

A nivel mundial, cerca del 75% de cultivos alimentarios dependen de especies como las abejas, mariposas, pájaros, polillas, escarabajos, murciélagos que contribuyen en diferente medida el proceso de polinización, favoreciendo de manera directa la reproducción efectiva de las plantas (FAO, 2021). Sin embargo, las abejas melíferas (Familia *Apidae*) sobresalen por su alta eficiencia, resultando fundamentales en la producción de agroalimentos con un papel determinante en la cantidad y calidad de la producción agrícola.

En décadas recientes, diferentes estudios han reportado una disminución en las poblaciones de las abejas melíferas a escala global. El uso excesivo de plaguicidas, la agricultura intensiva, el cambio climático y la introducción de especies exóticas, se incluyen como algunas de sus causas (Heilblum-Robles, 2019). A finales de 2019, existió un avistamiento y capturas de ejemplares del avispa gigante asiático (*Vespa mandarinia*) en Columbia Británica, Canadá y en el estado de Washington en EUA (Looney *et al.*, 2020; Wilson *et al.*, 2020; CABI, 2020), generando esto un posible riesgo sanitario en el continente americano.

Algunas especies del género *Vespa* se consideran un agente de riesgo en los procesos de polinización (Arca *et al.*, 2014; Rortais *et al.*, 2017). Estas especies se han adaptado a nuevas regiones geográficas demostrando ser factores de riesgo sanitario al actuar como depredadores de poblaciones de insectos nativos, arañas y abejas melíferas (Cini *et al.*, 2018).

V. mandarinia es una especie invasora a escala global, posee gran plasticidad genética y alta adaptabilidad a nuevos ambientes (Perrard *et al.*, 2014). Es una especie omnívora, principalmente insectívora (SENASICA-SA 2020), y según Makino (2016), ocupa el rango más alto en la cadena alimenticia de artrópodos dentro de su área de distribución geográfica, con afectaciones directas en las poblaciones de polinizadores, particularmente a las abejas. Existe evidencia que un grupo de 20 a 30 ejemplares pueden causar la muerte de 5.000 a 25.000 abejas en un período entre una y seis horas (Yanagawa *et al.*, 2007; Smith-Pardo *et al.*, 2020). Existen reportes de apicultores en áreas nativas que señalan que entre el 10 y el 20% de las colonias de abejas melíferas sufren cada año daños considerables e incluso que han logrado exterminar una colonia en cuestión de horas (Medina-Medina *et al.*, 2020).

La posible introducción y establecimiento de *V. mandarinia* podría repercutir en una invasión biológica con afectaciones indirectas al componente ecológico y económico de productos agroalimentarios (Cuadro 5.1). Bajo el enfoque “One Health”, esta especie representa un riesgo sanitario compartido al propiciar impactos negativos en el ambiente, la economía y la salud pública (Looney *et al.*, 2020), y de manera indirecta puede traer afectaciones en cultivos agroalimentarios dependientes de la polinización (AGRONET, 2020).

El riesgo sanitario asociado a *V. mandarinia* radica en que tiende a monopolizar el territorio de abastecimiento de alimento (Medina-Medina *et al.*, 2020). Se considera una avispa eusocial que realiza ataques grupales contra colmenas y otros nidos de avispa, en tres etapas: caza, sacrificio y ocupación (OIRSA, 2020), causando afectaciones a las poblaciones de polinizadores e indirectamente una posible disminución de cultivos agroalimentarios dependientes de la polinización.

La distribución potencial de una especie resulta un componente importante en la definición de estrategias preventivas (Robinet *et al.*, 2018). El modelado de distribución potencial ha demostrado ser útil para explorar patrones de posible expansión y predecir condiciones ambientalmente óptimas (Fick & Hijmans, 2017; Pablo *et al.*, 2019). Aquí, se empleó el método

de máxima entropía para caracterizar el ambiente semejante donde se ha observado la especie (Kery, 2011), y puede considerarse como la probabilidad de presencia de la misma (Royle *et al.*, 2012). Este modelo posee la capacidad de estimar la extensión de hábitat y ha sido aceptado como un método eficiente para determinar una gestión eficaz en el riesgo de plagas exóticas (Dae-Hyeon *et al.*, 2018).

Por lo que, en este capítulo se utilizó este modelo para estimar el riesgo sanitario de *V. mandarinia* en México, semejante al realizado por Nuñez-Penichet *et al.* (2020), para la región de Norteamérica, y con ello crear un diagnóstico del riesgo sanitario del avispon gigante asiático bajo un enfoque de epidemiología espacial, con el propósito de coadyuvar en la toma de decisiones en los procesos de vigilancia epidemiológica y de esta manera, proporcionar insumos cartográficos que permitan direccionar estrategias preventivas como medida de protección (técnica y científica) al sector agroalimentario mexicano.

5.2. Materiales y métodos

5.2.1. Zona de estudio

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Información (INEGI 2021), la República Mexicana se localiza en la porción meridional de Norteamérica en el continente americano, colinda al norte con Estados Unidos de América y al sur-sureste con Guatemala y Belice, así como con el Golfo de México y el Océano Pacífico, al este y oeste, respetivamente. Administrativamente se integra por 32 entidades federativas y por un total de 2.471 municipios (Figura 5.1).

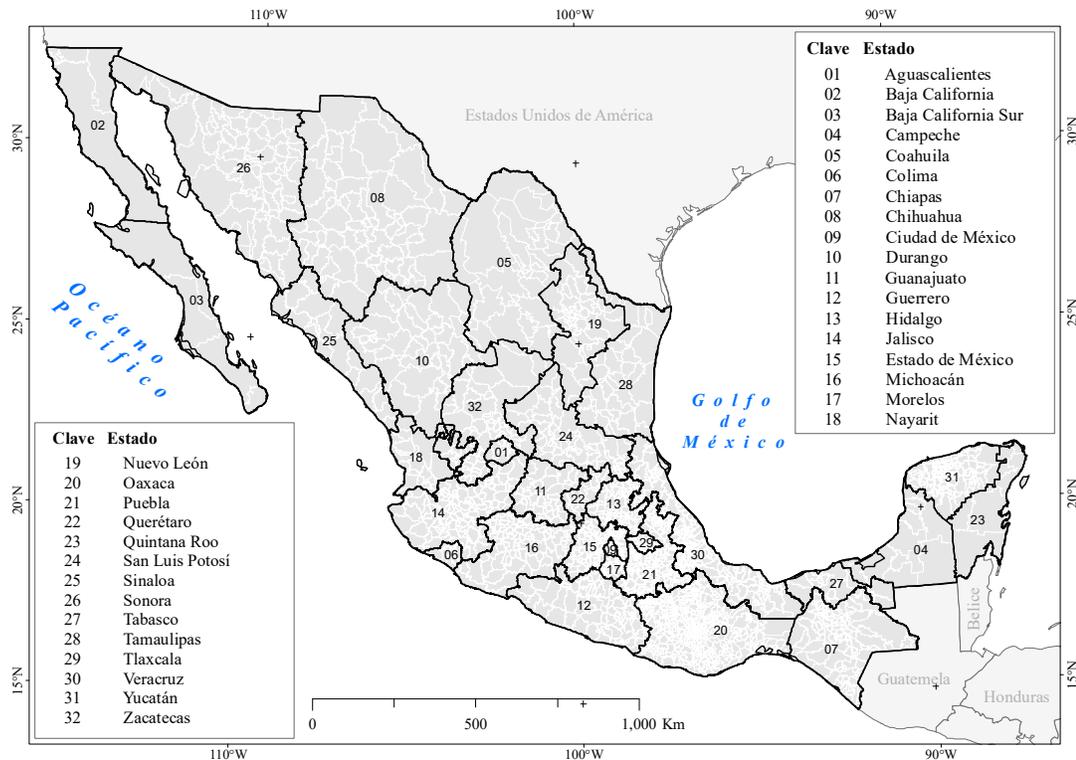


Figura 5.1. Conformación territorial de México. Fuente: Elaboración propia con datos del Marco Geoestadístico Nacional, INEGI.

5.2.2. Metodología

Para dar cumplimiento al objetivo de la investigación, se realizó el modelo cartográfico de riesgo sanitario de *V. mandarinia* que integró los siguientes componentes: cultivos agroalimentarios con dependencia a la polinización en 4 rangos (detallados en el Cuadro 5.1), la distribución potencial del avispon gigante asiático, una regionalización por cuadrantes sanitarios y la caracterización de conglomerados (clúster) definidos conforme a la distribución espacial del componente epidémico de la especie. Un cuadrante fitosanitario prioritario es un área que reúne las características epidémicas considerando el componente (patógeno/ambiente/hospedante) en la posible, introducción, establecimiento o dispersión de amenazas para la salud de las plantas.

La polinización es determinante en la calidad de productos agroalimentarios específicamente en sabor, olor, color y valor nutrimental (Klein *et al.*, 2007). Para cuantificar la dependencia de los cultivos de sus polinizadores, se utilizó la agrupación de productos agroalimentarios expresado en porcentaje de polinización de acuerdo a Heiblum-Robles (2019), en la que indican los cultivos de importancia económica y su porcentaje de polinización (Cuadro 1). El impacto más bajo, un 10% de déficit en la polinización, indica que se puede producir hasta un 10% menos de los cultivos implicados, y de manera extrema, un 100% de dependencia a la polinización indica que sin polinizadores no pueden existir esos productos agroalimentarios.

Cuadro 5.1. Grupos de cultivos agroalimentarios del sector agrícola mexicano conforme porcentaje de polinización.

Porcentaje de Polinización			
0 a 10%	11 a 40%	41 a 90%	91 a 100%
Chile	Café	Almendra	Cacao
Papaya	Soya	Pepino	Vainilla
Limón	Algodón	Manzana	Melón
Naranja	Girasol	Aguacate	Sandia
Cacahuate	Fresa	Mango	Calabaza
Frijol	Berenjena	Durazno	Calabacita
Linaza	Higo	Frambuesa	

Tomado de Klein *et al.* (2007).

Se realizó una reclasificación espacial de los Cultivos Agroalimentarios del Sector Agrícola Mexicano según Porcentaje de Polinización (en adelante CA-SAM-PP), definiendo los cuatro grupos descritos anteriormente. Para cada grupo, se calcularon las relaciones topológicas a nivel municipal conforme a la superficie sembrada (expresada en hectáreas), lo cual, se obtuvo a partir de los datos oficiales de estadísticas agrícolas del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SIAP-SADER. 2018).

La definición espacial se realizó a través de un procedimiento de unión entre relaciones espaciales por medio de la herramienta “Join” utilizado para incorporar atributos entre una base de datos y una cobertura espacial (límite municipal). El proceso involucró la relación por campos semejantes, mediante la utilización de la clave municipal definida por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Información. En este caso se consideró, el total de superficie sembrada, los grupos de cultivos de importancia económica según porcentaje de polinización y los límites municipales, enmascarados en la superficie agrícola del continuo nacional de la cobertura de uso de suelo y vegetación, escala 1:250000 (Serie VI del INEGI 2016; <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>).

El espacio geográfico otorga el soporte para que los aspectos relacionales proporcionen generalidades de las entidades que se analizan (Buzai & Baxendale 2011), identificando desde una perspectiva geométrica, la conexión entre diferentes atributos sobre un territorio específico (Fuenzalida *et al.*, 2015). Las relaciones topológicas (operaciones de tipo lógico) permiten la unión de atributos geográficos (total de superficie sembrada), conforme un límite territorial mediante las relaciones de los elementos en el espacio (límite municipal), lo que permite combinar eficazmente información básica para obtener información derivada y no existente.

El segundo criterio que se estimó fue el modelo distribución potencial de *V. mandarinia*. Para ello, el modelo incorporó datos georreferenciados de las detecciones ocurridas a finales de 2019 en British Columbia y en Blaine en Norteamérica (Looney *et al.*, 2020), como áreas invadidas, y en Pakistán (Khaliq-Khan *et al.*, 2017) y Japón (Fujiwara *et al.*, 2016) como áreas nativas. La distribución potencial se estimó a través de datos de presencia, expresados en coordenadas geográficas (latitud, longitud) con datum WGS84 (Ponder *et al.*, 2001; Stockwell & Peterson, 2002). El procesamiento en el software de MaxEnt (Phillips *et al.*, 2004), se inició con el uso de una semilla aleatoria de forma iterativa con un porcentaje del tamaño de la muestra de validación de 0.2. Este proceso se realizó por la asociación espacial entre los sitios de presencia con las variables ambientales de la base global BIOCLIM (Cuadro 5.2), en el software MaxEnt v3.3.3e. lo que permitió predecir la distribución probable de la especie (Phillips *et al.*, 2004), siendo las áreas que satisfacen los requisitos del nicho ecológico las que permiten definir parte de la distribución potencial del avispon gigante asiático (Anderson y Martínez, 2004).

Cuadro 5.2. Variables macroambientales utilizadas en el modelado de distribución potencial.

	Clave	Variable	Unidad
Temperatura	BIO1	Temperatura media anual	
	BIO2	Rango diurno medio (Media mensual (temp máx - temp mín))	
	BIO3	Isotermalidad (BIO2 / BIO7) ($\times 100$)	
	BIO4	Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar $\times 100$)	
	BIO5	Temperatura máxima del mes más cálido	
	BIO6	Temperatura mínima del mes más frío	°C
	BIO7	Rango anual de temperatura (BIO5-BIO6)	
	BIO8	Temperatura media del cuarto más húmedo	
	BIO9	Temperatura media del cuarto más seco	
	BIO10	Temperatura media del trimestre más cálido	
	BIO11	Temperatura media del cuarto más frío	
Precipitación	BIO12	Precipitación anual	mm
	BIO13	Precipitación del mes más húmedo	mm
	BIO14	Precipitación del mes más seco	mm
	BIO15	Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación)	%
	BIO16	Precipitación del cuarto más húmedo	mm
	BIO17	Precipitación del barrio más seco	mm
	BIO18	Precipitación del trimestre más cálido	mm
	BIO20	Precipitación del cuarto más frío	mm

A través de la superposición cartográfica mediante una intersección de coberturas se realizó un enmascaramiento con la superficie agrícola nacional (serie VI), lo que permitió delimitar territorialmente las áreas en riesgo sanitario. En complemento, se elaboró una rejilla (o

grid) por divisiones de tipo lógicas, que es una técnica que posee gran aptitud en la definición y caracterización de territorios estructurados espacialmente (Buzai y Baxendale, 2011).

Finalmente, se realizó la asociación del análisis espacial/epidemiológico y el análisis de clúster, lo que permitió la caracterización espacial del riesgo sanitario (Dal Maso & Montecchio, 2014). El modelo de riesgo sanitario resultante se evaluó mediante el *Índice de Moran* que es una prueba geostatística que otorga certeza a la continuidad espacial del riesgo sanitario de *V. mandarinia*, permitiendo medir la autocorrelación espacial a partir de la ubicación del riesgo, evaluando si el patrón espacial está agrupado, disperso o aleatorio.

5.3. Resultados

El modelado y caracterización de productos dependientes de polinizadores en México identificó 5.141.355 ha de cultivos agroalimentarios susceptibles con cierta dependencia a la polinización (Figuras 5.2a, 5.2b, 5.2c, y 5.2d). Sin embargo, conforme con la importancia de polinización, el 4,88% de la superficie identificada requiere de una polinización totalmente efectiva (91 a 100%), un 13,50% requiere entre el 41 y 90%, 24,69% entre 11 a 40% y finalmente, más de la mitad de la superficie (57%) requiere de 1 a 10% de la polinización.

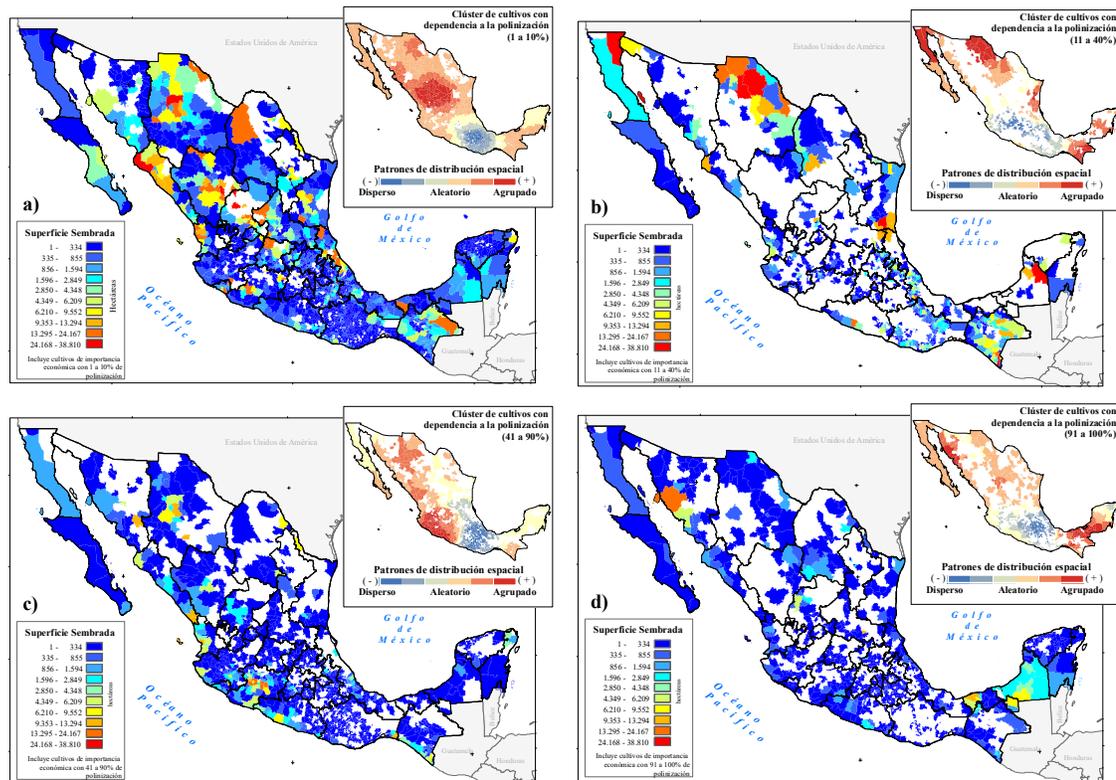


Figura 5.2. Distribución espacial de cultivos alimenticios del sector agrícola en México según porcentaje de polinización (CA-SAM-PP). Superficie sembrada (mapa ubicado del lado inferior izquierdo) y conglomerados (mapa de la esquina superior derecha): a) Grupo 1-10%, b) Grupo 11-40%, c) Grupo 41-90% y d) Grupo 91-100%. La representación espacial de la superficie sembrada se refleja en la cartografía mediante una paleta de colores que va de tonalidades frías a cálidas, es decir, de azul a rojo, representando de menor a mayor densidad respectivamente.

El modelo cartográfico de productos agrícolas dependientes a la polinización permitió identificar áreas compactas de riesgo sanitario con un patrón de distribución espacial agrupado. El grupo CA-SAM-PP (1-10%) identificó dos conglomerados con la mayor densidad (Figura 5.2a) y el grupo CA-SAM-PP (11-40%) cinco conglomerados con la mayor densidad (Figura 5.2b). Dentro del grupo CA-SAM-PP (41-90%) se identificaron dos agrupamientos con la mayor densidad (Figura 5.2c) y finalmente para el grupo CA-SAM-PP (91-100%) permitió definir dos conglomerados con la mayor densidad (Figura 5.2d). Los conglomerados o agrupamientos altamente densos (Figuras 2a, 2b, 2c, y 2d, parte superior derecha de cada mapa), poseen un patrón de distribución espacial agregado estadísticamente significativo, revelando que existen superficies con una considerable concentración de los cultivos señalados en el Cuadro 5.1.

La distribución potencial de *V. mandarinia* resultó ser un modelo confiable respaldado en el análisis del área bajo la curva (valor ROC (“Receiver Operating Characteristic”) = 0.903; modelo óptimo: $0.7 < \text{ROC} > 1$; Herrick *et al.*, 2013). Estadísticamente el modelo de distribución potencial es equivalente a un proceso de Poisson puntual ponderado (Fithian y Hastie 2013; Royle *et al.*, 2012), es decir, la distribución potencial de *V. mandarina* fue definida por circunstancias restrictivas asociadas de manera positiva al componente térmico.

Ambientalmente, el modelo de similitud climática del avispon gigante asiático respondió a contribuciones térmicas que favorecen la distribución potencial de la especie en un 51,4%. De manera específica las variables con mayor aporte fueron la isothermalidad (BIO3) y el rango anual de temperatura (BIO7), las cuales, caracterizaron el modelo en un 36,5% y 14,9% respectivamente, similar a trabajos previos (Barbet-Massin *et al.*, 2020).

Territorialmente, se identificaron las áreas ambientalmente óptimas en la distribución potencial de *V. mandarinia* en la Planicie Costera del Golfo e Istmo de Tehuantepec donde existen condiciones ambientales con aptitud media/alta semejantes a las referencias. Además, se identificaron superficies de menor extensión en la Península de Yucatán, Península de Baja California y porciones de la Costa del Pacífico, donde presenta una aptitud ambiental de media/baja que no dejan de representar un riesgo sanitario al identificarse como áreas que ambientalmente tienen el potencial que favorece a la especie (Figura 5.3).

5.3.1. Riesgo sanitario bajo

Finalmente, el análisis de riesgo sanitario con el enfoque espacial epidemiológico permitió caracterizar un diagnóstico en cuatro niveles de riesgo: bajo (Figura 5.4), medio (Figura 5.5), alto (Figura 5.6) y muy alto (Figura 5.7). A escala nacional, la superficie en riesgo sanitario bajo representó 2.879 millones de hectáreas. Las consideradas prioritarias, se distribuyen en el centro y norte de Veracruz, así como en Tabasco (tonalidades rojas y naranja) fuera de los conglomerados sanitarios identificados, lo que sugiere que son áreas extensas con diversidad de cultivos dependientes de la polinización en un rango del 1 a 10%. El nivel de riesgo sanitario bajo involucró 1.979 municipios que en conjunto aportaron 74,8 billones de pesos mexicanos al valor de la producción del año de referencia, en este nivel de riesgo los cultivos estratégicos son: cacahuete, chile seco, chile verde, frijol (en tres modalidades), limón, limón real, linaza, linaza ornamental, naranja y papaya (SIAP-SADER. 2018) (Figura 5.1a).

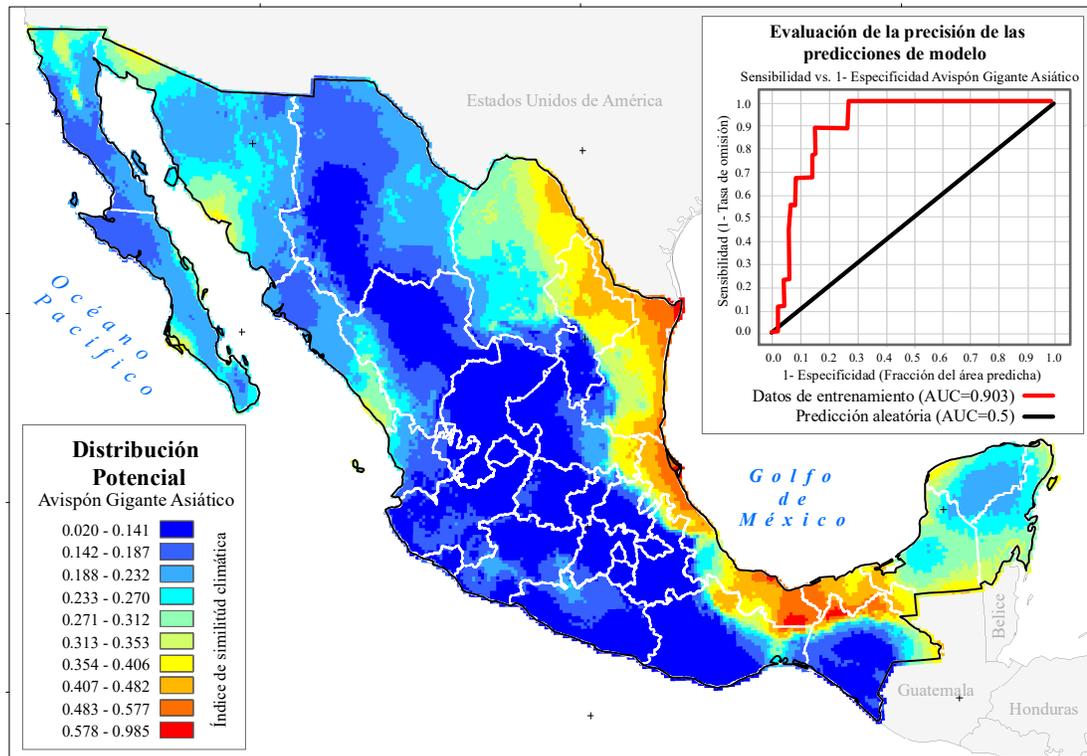


Figura 5.3. Distribución potencial del avispón gigante asiático en México, de acuerdo al componente ambiental. En la esquina superior derecha se muestra el análisis del área bajo la curva (AUC).

Regionalmente, en riesgo sanitario bajo se identificaron 1,621 cuadrantes óptimos para realizar estrategias preventivas de vigilancia epidemiológica para *V. mandarinia*, de los cuales 443 se consideran prioritarios. Se identificaron cuatro clústeres agroalimentarios con dependencia a la polinización entre 1 y 10%, el de mayor importancia por extensión abarca la mayor parte del estado de Zacatecas, la porción sur-sureste de Durango, el altiplano Potosino y pequeñas porciones del suroeste de Coahuila, norte de Aguascalientes y norte de Jalisco (Figura 5.4).

En complemento, existen dos clústeres agrícolas secundarios adyacentes al anterior: el de menor extensión abarca la zona centro y altiplano de San Luis Potosí, las porciones sur de Aguascalientes y Zacatecas, así como el norte de Guanajuato y Jalisco, del mismo modo abarcó la porción norte del país desde la parte central de Nuevo León, Sur de Coahuila, norte de Durango, extendiéndose por casi todo Sinaloa hasta la parte Sur de Sonora, y finalmente el cuarto clúster se ubica al norte del estado de Chihuahua (Figura 5.4).

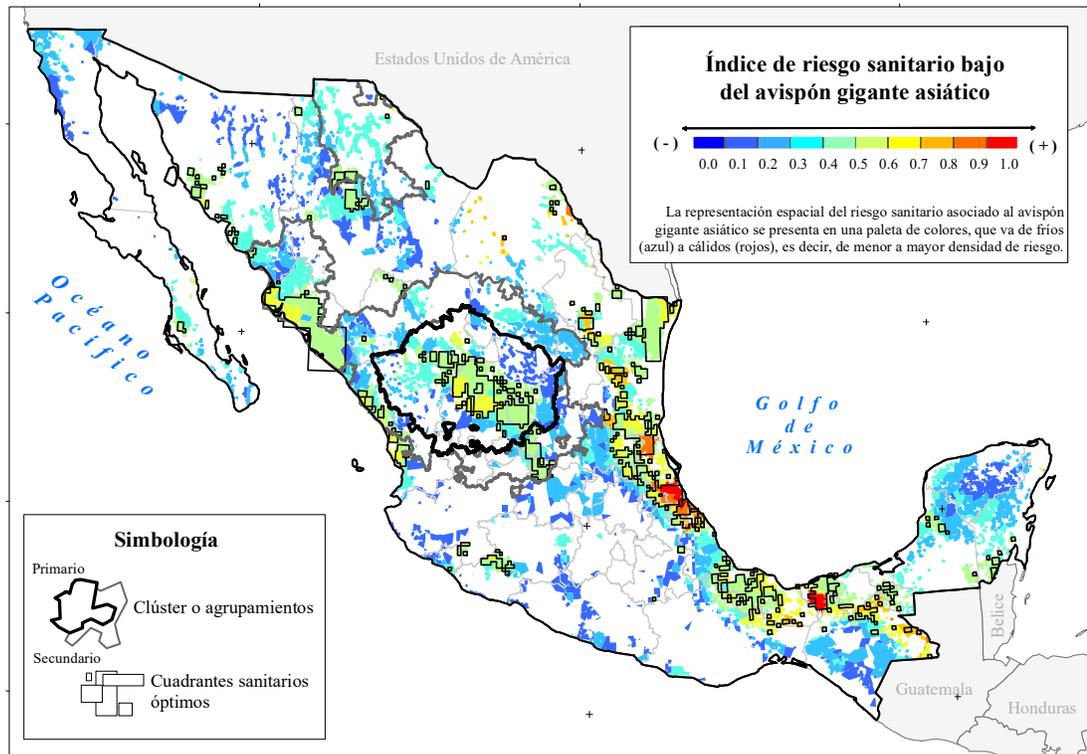


Figura 5.4. Modelo cartográfico de riesgo sanitario bajo asociado al avispon gigante asiático y cultivos agroalimentarios con dependencia a la polinización entre 1 y 10%.

5.3.2. Riesgo sanitario medio

En la República Mexicana la superficie en riesgo sanitario medio permitió identificar 1.341 millones de hectáreas, que involucran el ambiente óptimo para el avispon gigante asiático. Esta superficie se distribuyó en 726 municipios, y se obtuvo a partir de la distribución espacial de los cultivos: algodón, berenjena, café, fresa (fruta y planta), girasol, girasol grueso, higo y soya, que de manera conjunta presentaron un aporte económico estimado de 37,04 billones de pesos mexicanos (SIAP-SADER. 2018) (Figura 5.1b).

A escala regional, como riesgo sanitario medio se identificó a la región Huasteca que comparten los estados de Tamaulipas, Veracruz y San Luis Potosí (tonalidades rojas y naranja). Así mismo, se identificaron 771 cuadrantes óptimos para realizar acciones preventivas de vigilancia epidemiológica, de los cuales 257 se pueden considerar prioritarios. Además, se identificaron cuatro clústeres agrícolas prioritarios y dos secundarios (Figura 5.5).

En orden de magnitud, se encontró el clúster que abarca desde la región Huasteca norte y se extiende por la planicie costera del golfo en Veracruz, San Luis Potosí, la porción este de Nuevo León y Tamaulipas (tonalidades de naranja a rojo). Seguida de una extensión en riesgo sanitario medio (tonalidades de amarillo a verde) por el clúster defendido en el norte de Chihuahua y noroeste de Coahuila. Así mismo se ubican los clústeres secundarios en el norte de la península de Baja California y otra en la porción central de la Península de Yucatán (Figura 5.5).

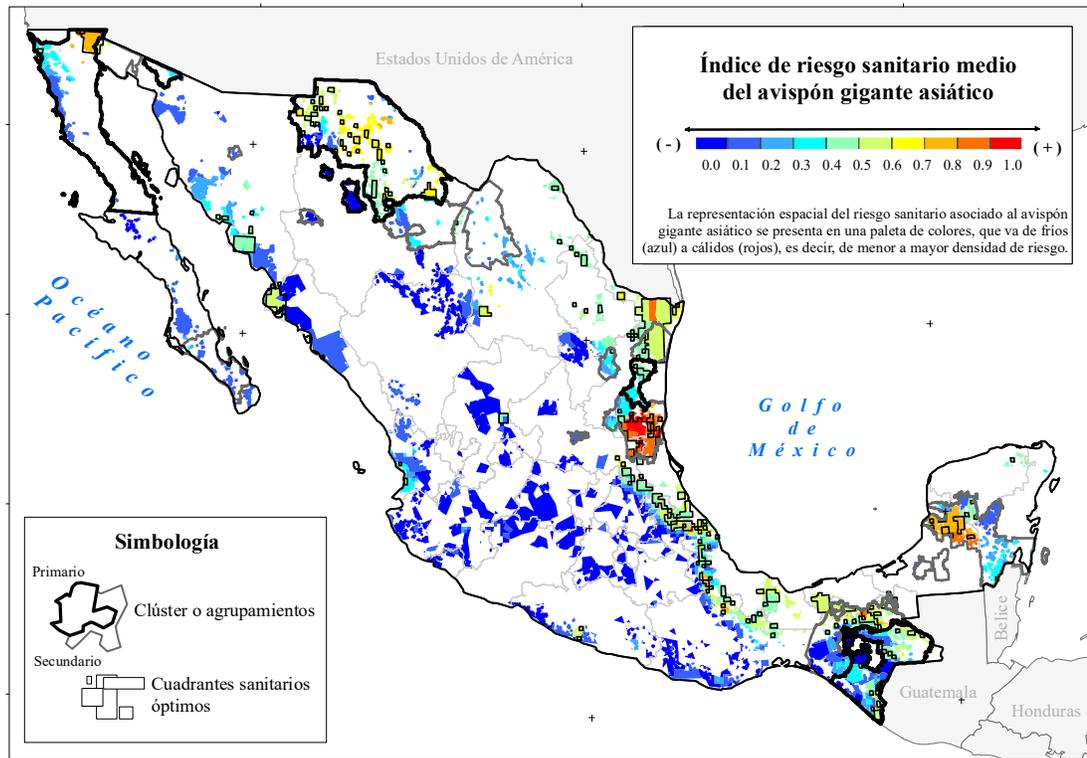


Figura 5.5. Modelo cartográfico de riesgo sanitario medio asociado al avispon gigante asiático y cultivos agroalimentarios con dependencia a la polinización entre 11 y 40%.

5.3.3. Riesgo sanitario alto

A escala nacional, el riesgo sanitario alto se identificó para 638 mil hectáreas con el potencial de favorecer la introducción y establecimiento de *V. mandarinia*, siendo áreas cultivables que necesitan de 41 a 90% de polinización para una producción agroalimentaria efectiva, e involucró los cultivos de aguacate, durazno, frambuesa, mango, manzana y pepino. Dicha superficie se distribuyó en 460 municipios, que de manera conjunta aportaron 71,10 billones de pesos mexicanos al PIB agrícola nacional (SIAP-SADER. 2018) (Figura 5.1c).

A nivel regional, la superficie prioritaria se ubicó en una porción entre Sinaloa y Nayarit (tonalidades rojo) en un clúster agroalimentario secundario. De igual manera, se identificó 1.175 cuadrantes óptimos de los cuales 349 se pueden considerar prioritarios. En complemento, se identificó un clúster prioritario de gran extensión en la región occidente/pacífico y tres secundarios adyacentes a la costa noroeste del Pacífico (Figura 5.6).

El clúster prioritario en riesgo alto abarca el centro y norte del estado de Jalisco, Colima, de la porción central a la costa de Michoacán y la porción adyacente de Guerrero donde existen áreas de riesgo sanitario representadas en tonalidades de amarillo a naranja. Los clústeres secundarios representan una franja que abarca de Sonora y Chihuahua hasta Guerrero, seccionada en tres porciones: 1) al norte del territorio, entre Sonora y Chihuahua, 2) en la porción costa del Pacífico sur de Sinaloa y sur-sureste de Durango, y 3) en la región occidente/pacífico adyacente al clúster prioritario (Figura 5.6).

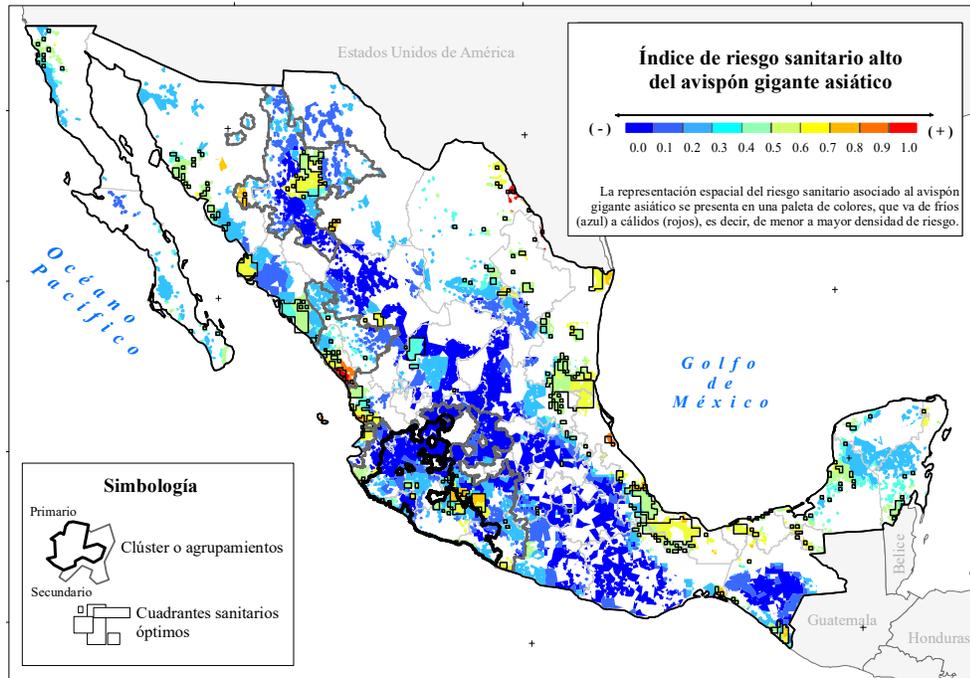


Figura 5.6. Modelo cartográfico de riesgo sanitario alto asociado al avispon gigante asiático y cultivos agroalimentarios con dependencia a la polinización entre 41 y 90%.

5.3.4. Riesgo sanitario muy alto

A escala regional y con el más elevado nivel de riesgo sanitario (muy alto) se identificó una superficie de 236 mil hectáreas, así como 989 cuadrantes óptimos, de los cuales 184 se pueden considerar prioritarios. Cabe señalar que, de manera local los territorios prioritarios se ubican en el oeste de Tabasco (tonalidad roja), así como en porciones del norte de Campeche, Noreste de Tamaulipas y en la costa central del estado de Sonora (tonalidad naranja). Además, en la planicie costera del golfo desde Tamaulipas hasta Campeche existen condiciones de riesgo sanitario muy alto, representado en tonalidades de verde a amarillo. Así mismo en un nivel de riesgo muy alto con menor intensidad (tonalidades de verde a azul agua) se encuentra la costa del Pacífico desde Sonora hasta Nayarit (Figura 5.7). La estimación del riesgo sanitario muy alto involucró a los cultivos de cacao, calabacita, calabaza, calabaza para semilla, melón, melón amargo, sandía y vainilla distribuidos en 853 municipios que de manera conjunta presentaron un aporte de 15.60 billones de pesos como valor de producción (SIAP-SADER, 2018) (Figura 5.1d).

Regionalmente, en riesgo sanitario muy alto se identificaron dos clústeres prioritarios y uno secundario, en orden de importancia el primer prioritario se ubicó en el sureste de México en Tabasco y Campeche, circundado por una superficie compacta secundaria. El segundo se ubicó en la costa de Sonora con una porción adyacente al sur y norte del mismo estado. Así mismo, se identificó un clúster secundario en la porción este del estado de Durango con menor extensión territorial. Cabe señalar el riesgo sanitario de *V. mandarinia* muy alto espacialmente coincidió con la ubicación de los clústeres prioritarios óptimos para la vigilancia epidemiología del avispon gigante asiático (Figura 5.7).

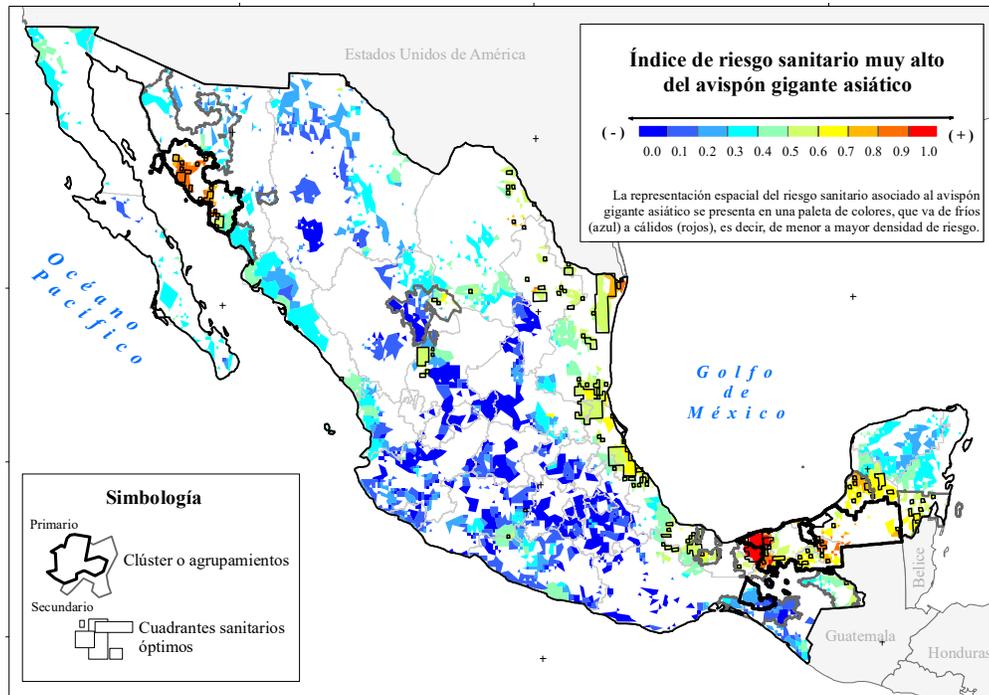


Figura 5.7. Modelo cartográfico de riesgo sanitario muy alto asociado al avispon gigante asiático y cultivos agroalimentarios con dependencia a la polinización entre 91 y 100%.

Los 5.14 millones de ha con algún nivel de riesgo sanitario (bajo, medio, alto y muy alto) puede favorecer la introducción o establecimiento del avispon gigante asiático. Sin embargo, los 17 clústeres definidos mediante la interacción espacial de las condiciones ambientales (mayormente por el factor térmico) y la extensión de cultivos dependientes a la polinización, contó con un patrón de distribución espacial agrupado, siendo áreas consideradas estadísticamente significativas, resultado que se respaldó por una autocorrelación espacial elevada, sustentada en el Índice de Moran (IM), que según el nivel riesgo se obtuvo: (riesgo sanitario bajo, IM: 0.3176), (riesgo sanitario medio, IM: 0.1840), (riesgo sanitario alto, IM: 0.2470) y (riesgo sanitario muy alto, IM: 0.6926). Además, los cuatro niveles de riesgo sanitario presentaron un “z-score” y un “p-value” elevados, lo que indica que existe menos del 1% de probabilidad que el agrupamiento del riesgo sanitario para *V. mandarinia* en los cuatro niveles analizados pueda ser resultado de la casualidad.

5.4. Discusión

El diagnóstico espacial del riesgo sanitario del avispon gigante asiático permitió identificar superficies óptimas en las que se podrían establecer, realizar o re-direccionar estrategias de vigilancia epidemiológica a escala regional y local. Se determinó el riesgo sanitario en cuatro rangos (bajo, medio, alto y muy alto) expresado de manera espacial en tonalidades de colores fríos (azul), cuando existe un nivel de riesgo sanitario mínimo, y por el contrario en tonalidades marrón (rojo) cuando el nivel de riesgo sanitario elevado. El ambiente óptimo para el desarrollo del avispon gigante asiático ante la posible introducción o establecimiento en la República mexicana fue determinado en buena medida por el factor térmico, y las áreas prioritarias para la vigilancia epidemiológica se definieron en asociación con la distribución potencial de *V. mandarinia* y el porcentaje de polinización de cultivos de importancia económica.

De manera específica, se identificaron porciones territoriales prioritarias para establecer o direccionar estrategias preventivas ante una posible introducción o establecimiento de *V. mandarinia*, las cuales se denominaron cuadrantes sanitarios. Estos cuadrantes involucran la superficie sembrada de cultivos agroalimentarios según porcentaje de priorización. Mientras que los denominados clústeres agroalimentarios se crearon conforme al patrón de distribución de cada nivel de riesgo sanitario (bajo, medio, alto y muy alto). Esto se realizó mediante la integración de las relaciones inter-específicas de la biología y hábitos del avispon gigante asiático, considerado un agente con potencial devastador para la apicultura y en consecuencia para la agricultura. En un contexto espacial epidemiológico, se identificaron regionalmente 4.556 cuadrantes en riesgo sanitario, de los cuales el 27,34% se pueden considerar cuadrantes prioritarios. Además, fueron definidos 17 clúster sanitarios que epidemiológicamente cumplen con las condiciones que favorecen la introducción o establecimiento de *V. mandarinia*.

Los productos dependientes de polinizadores son en su mayoría frutas, semillas y nueces, que proveen una mayor riqueza nutrimental y son fuentes principales de vitaminas A, C, ácido fólico y otros micronutrientes (Potts *et al.*, 2016). Al respecto, en México existen cerca de 5 millones de hectáreas de cultivos con cierto nivel de dependientes a la polinización con un aporte económico de alrededor de 5,1 billones de pesos mexicanos, que de manera indirecta podrían verse afectadas por el comportamiento depredador e invasor del avispon gigante asiático, lo que conllevaría afectaciones en la seguridad alimentaria, así como en la economía apícola y agrícola nacional. Cabe señalar que en cada categoría pueden existir repercusiones en la seguridad alimentaria, reflejando una insuficiencia de alimentos como frutas, verduras, semillas y nueces, señaladas en el Cuadro 5.1, lo cual puede ser reflejando territorialmente según el nivel de riesgo sanitario expresado en la cartografía (Figuras 5.4, 5.5, 5.6 y 5.7).

El modelado geoespacial aplicado a problemas sanitarios, ha contribuido en la elaboración de escenarios de riesgo con una perspectiva epidemiológica, espacial y temporal (Photis, 2016; Robinet *et al.*, 2018; Lioy *et al.*, 2019). Se puede considerar una estrategia con el potencial de fortalecer la toma de decisiones ante el riesgo que representan las plagas exóticas como el avispon gigante asiático, de manera específica sobre la estimación, determinación y priorización de superficies para llevar a cabo las acciones de vigilancia epidemiológica sanitaria en un área geográfica. Nuestros resultados se presentan como una estrategia para fortalecer las acciones de exploración, trampeo preventivo y colocación de parcelas centinelas bajo un enfoque preventivo para contrarrestar los posibles efectos adversos que ocasionan las invasiones biológicas.

Bajo el enfoque de “One Health”, las medidas sanitarias deben “*Sustentarse en evidencias y principios científicos, tomando en cuenta, cuando corresponda, las diferentes condiciones geográficas y otros factores pertinentes*”. Por ello la presente investigación se desarrolló con base en la epidemiología espacial bajo la premisa de que todos los fenómenos desarrollados en el territorio se encuentran relacionados unos con otros (Pesce, 2010; Valera-Bernal, 2012). Esta investigación permitió examinar las conexiones existentes, al considerar sus influencias recíprocas para comprender las causas (epidemiología de la especie) y consecuencias (las posibles afectaciones al sector agrícola) (Rojas-Salazar, 2005; Buzai, 2007).

El modelo cartográfico de riesgo sanitario puede considerarse una herramienta tecnológica con el potencial de fortalecer las acciones de prevención ante la posible, introducción establecimiento y dispersión de especies consideradas invasoras, como el avispon gigante. Los resultados obtenidos otorgan un sustento técnico/científico que permite coadyuvar en el fortalecimiento de estrategias en el control y manejo de plagas exóticas, al explicar su variabilidad y la capacidad de dispersión (Tapia-Rodríguez *et al.*, 2020). Sumado a esto, este tipo de enfoques ha contribuido en la evaluación de la incidencia de plagas y enfermedades trasfronterizas

(Márquez-Pérez *et al.*, 2018) y es utilizado en la definición de clúster de riesgo fitosanitario (Rivera-Martínez *et al.*, 2020).

La biología y hábitos de la especie resultan elementos esenciales en la estimación del riesgo sanitario (Safni *et al.*, 2018). De manera particular permiten coadyuvar en el control de plagas agrícolas (van den Eynde *et al.*, 2020), así como fortalecer los sistemas de pronóstico de plagas y enfermedades en materia de especies exóticas (Islam, 2018). De acuerdo con Hutchinson (1957) es vital integrar los requisitos para la sobrevivencia de la especie, que en Biología de la Conservación se denomina el nicho ecológico, es decir, la distribución potencial de la especie.

El modelo cartográfico obtenido de riesgo sanitario de *V. mandarinia* tiene el potencial de ser complementado con la integración de otros criterios o variables en la definición de la probabilidad de introducción, establecimiento o dispersión de la especie. De acuerdo con Norderud y colaboradores (2021), es pertinente realizar modelos con mayor definición espacial, lo cual se puede enriquecer con elementos muy puntuales como: el hábitat óptimo para anidación (biomasa forestal) y la proximidad con nodos comerciales (puertos marítimos con arribo de cargueros transcontinentales), que son elementos que incrementan el riesgo de introducción del avispon gigante asiático a México y de manera general al continente americano.

5.5. Conclusión

Los problemas sanitarios deben estudiarse bajo una perspectiva integradora, ya que los organismos exóticos interactúan en un nuevo ecosistema. Por tanto, es primordial diseñar y aplicar estrategias con base en investigación científica que permita fortalecer la implementación de estrategias en la prevención, control y erradicación de problemas fito-zoosanitarios y de salud pública. Los modelos cartográficos de riesgo sanitario de *V. mandarinia* (bajo, medio, alto y muy alto) obtenidos en esta investigación presentan una mejora en la resolución espacial empleada, respecto a modelos previos publicados a nivel continental. Por lo que, se lograron identificar áreas territorialmente más detalladas para fortalecer las acciones preventivas ante una posible introducción, establecimiento o dispersión en la República Mexicana.

Los territorios o superficies identificados en algún nivel de riesgo sanitario (bajo, medio, alto o muy alto) puede considerarse un insumo técnico/ científico con el potencial de coadyuvar en el establecimiento o ubicación de estrategias en la red de vigilancia epidemiológica del avispon gigante asiático en territorio mexicano. Sin embargo, es pertinente considerar otros criterios esenciales en la epidemiología del avispon gigante asiático, como la temporalidad de los cultivos estratégicos asociados a los cuatro rangos de polinización (1-10%; 11-40%; 41-90% y 91-100%). Incluso es primordial considerar la ubicación geográfica (proximidad) respecto a los sitios de ingreso de mercancías procedentes donde *V. mandarina* se encuentra presente (puertos, aeropuertos y puntos fronterizos).

5.6. Literatura citada

- Agronet. (2020). Avispones gigantes ponen en riesgo ecosistemas. Agronet. Ministerio de Agricultura. Consultado: 1 de junio de 2020. Disponible en: <https://www.agronet.gov.co/Noticias/Paginas/Avispones-gigantes-ponen-en-riesgo-ecosistemas.aspx>
- Anderson, R.P. and Martinez-Meyer, E. (2004). Modeling species geographic distributions for preliminary conservation assessments: an implementation with the spiny pocket mice (*Heteromys*) of Ecuador. *Biological Conservation*. 116:167–179.
- Arca, M., Papachristoforou, A., Mougel, F., Rortais, A., Monceau, K., Bonnard, O., Tardy, P., Thiéry, D., Silvain, JF. and Arnold, G. (2014). Defensive behaviour of *Apis mellifera* against *Vespa velutina* in France: Testing whether European honeybees can develop an effective collective defence against a new predator. *Behavioural Processes*. 106:122–129.
- Barbet-Massin, M., Rome, Q., Muller, F., Perrard, A., Villemant, C. and Jiguet, F. (2013). Climate change increases the risk of invasion by the Yellow-legged hornet. *Biological Conservation*. 157:4–10.
- Buzai, G.D. (2007). Dilemas de la relación Geografía-SIG entre la disciplina, la interdisciplina y la transdisciplina. *GeoFocus*. 7:5-7.
- Buzai, G.D. y Baxendale, C.A. (2011) Análisis socioespacial con sistemas de información geográfica marco conceptual basado en la teoría de la geografía. Memorias del XIV Conferencia Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica Parte II. Consultado: 1 de mayo de 2020. Disponible en: <https://bit.ly/3AtyAM1>
- CABI. (2020). Compendio de especies invasoras. *Vespa mandarinia* (Avispón gigante asiático). Consultado: 10 de noviembre de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3nyPDV6>
- CEDRSSA. (2021). Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria. Consultado: 3 de octubre de 2021. Disponible en: <http://www.cedrssa.gob.mx/>
- Cini, A., Cappa, F., Petrocelli, I., Pepicciello, I., Bortolotti, L. and Cervo, R. (2018). Competition between the native and the introduced hornets *Vespa crabro* and *Vespa velutina*: a comparison of potentially relevant life-history traits. *Ecological Entomology*. 43:351–362.
- Dae-Hyeon, B., Sunghoon-Jung. and Wang-Hee, L. (2018). Review of CLIMEX and MaxEnt for studying species distribution in South Korea. *Journal of Asia-Pacific Biodiversity*. 11: 325–333.
- Dal-Maso. E. and Montecchio, L. (2014). Risk of natural spread of *Hymenoscyphus fraxineus* with environmental niche modelling and ensemble forecasting technique. *Forest Research*. 3(4):1000131.
- FAO. (2014). Principios y Avances Sobre Polinización como Servicio Ambiental para la Agricultura Sostenible en Países de Latinoamérica y el Caribe. Consultado: 14 de noviembre de 2021. Disponible en: <http://www.fao.org/3/i3547s/i3547s.pdf>
- FAO. (2021). Es hora de apreciar la labor de los polinizadores. Consultado: 16 de febrero de 2022. Disponible en: <https://www.fao.org/fao-stories/article/es/c/1129811/>
- Fick, S.E. and Hijmans, R.J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*. 37:4302–4315.
- Fithian, W. and Hastie, T. (2013) Finite-sample equivalence of several statistical models for presence-only data. *Annals of Applied Statistics*. 7:1917–1939.
- Fuenzalida, M., Buzai, G.D., Moreno-Jiménez, A. y García de León, A. (2015). Geografía, geotecnología y análisis espacial: tendencias, métodos y aplicaciones. 1° Ed., Santiago de Chile: Editorial Triángulo. 213 p.

- Fujiwara, A., Sasaki, M. and Washitani, I. (2016). A scientific note on hive entrance smearing in Japanese *Apis cerana* induced by pre-mass attack scouting by the Asian giant hornet *Vespa mandarinia*. *Apidologie*. 47:789–791.
- Heiblum-Robles, A. (2019). Abejas: Insectos polinizadores. Oficina de Información Científica y Tecnológica para el Congreso de la Unión. Ciudad de México. 6 p. Consultado: 16 de diciembre de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3AkxGB9>
- Herrick, K.A., Huettmann, F. and Lindgren, M.A. (2013). A global model of avian influenza prediction in wild birds: the importance of northern regions. *Veterinary Research*. 44:42.
- Hutchinson, G. E. (1957). Concluding remarks. Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology. 22:415–427.
- INEGI. (2021). Marco Geoestadístico. Censo de Población y Vivienda 2020. Consultado: 16 de febrero de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3yDHDbA>
- Islam, W. (2018). Plant disease epidemiology: Disease triangle and forecasting mechanisms in highlights. *Hosts and Viruses*. 5:7–11.
- Kery, M. (2011). Towards the modelling of true species distributions. *Journal of Biogeography*. 38:617–618.
- Khaliq-Khan, A., Rafique Khan, M., Ather Rafi, M. and Qasim, M. (2017) Wasp fauna of (Eumeninae, *Vespinae* and *Polistinae*) of district Poonch, Azad Jammu and Kashmir (Pakistan). *Journal of Entomology and Zoology Studies*. 5:1587–1590.
- Klein, M.A., Vaissière, E.B., Cane, J.H., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, A.S., Kremen, C. and Tscharntke, T. (2007). Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the Royal Society B*. 274:303–313.
- Lioy, S., Manino, A., Porporato, M., Laurino, D., Romano, A., Capello, M. and Bertolino, S. (2019). Establishing surveillance areas for tackling the invasion of *Vespa velutina* in outbreaks and over the border of its expanding range. *NeoBiota*. 46:51–69.
- Looney, C., Spichiger, S.E., Salp, K., van Westendorp, P., Wojahn, R. and Cena, J. (2020). *Vespa mandarinia* in the Pacific Northwest - Initial responses to an invasion by the world's largest hornet. Washington State Department of Agriculture (WSDA), Olympia WA, British Columbia Ministry of Agriculture. Consultado: 14 de mayo de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3Ia6bfu>
- Makino S. (2016). Post-hibernation ovary development in queens of the Japanese giant hornet *Vespa mandarinia* (Hymenoptera: Vespidae). *Entomological Science*. 19:440–443.
- Márquez-Pérez, F.J., Flores-Sánchez, J.L., Rodríguez Mejía, L., Márquez Gómez, J., Michereff, S.J., Ancona, V., Robles-Bermúdez, A. and Domínguez-Monge, S. (2018). Progress and spatial pattern of Huanglongbing in Persian lime in Nayarit, Mexico. *Revista Bio Ciencias*, 5, e351.
- Medina-Medina, L.A., Quezada-Euán, J.J.G. and Vandame, R. (2020). Panorama general sobre el avispon gigante asiático (*Vespa mandarinia*) y riesgos de su posible introducción a México. Consultado: 10 de noviembre de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3hWCTVa>
- Norderud, D.E., Scott, L., Powell, R.K. and Peterson, D. (2021). Risk assessment for the establishment of the Asian giant hornet (*Vespa mandarinia*) in the Pacific Northwest. *Journal of Insect Science*. 21(4):1–14.
- Núñez- Penichet, C., Osorio-Olvera, L., Gonzalez, V.H., Cobos, M.E., Jimenez, L., de Raad, D.A., Aljkishe, A., Contreas-Diaz, R.G., Nava-Bolaños, A., Utsumi, K., Ashraf, U., Adeboje, A., Townsed- Peterson, A. and Soberon, J. (2021). Geographical potential of the world's largest hornet, *Vespa mandarinia* Smith (Hymenoptera: Vespidae), worldwide and particularly in North America. *PeerJ*, 9, e10690.

- OIRSA. (2020). Guía técnica Avispa Gigante Asiática (*Vespa mandarinia* Smith, 1852). Consultado: 10 de agosto de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3bMJMci>
- Pablo, M., Giovanni, L., Santilli, G., Huang, W and Zappacosta, D. (2019). Maxent model application for tree pests monitoring. *IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. pp. 6664–6667.
- Perrard, A., Baylac, M., Carpenter, J.M. and Villemant, C. (2014). Evolution of wing shape in hornets: why is the wing venation efficient for species identification?. *Journal of Evolutionary Biology*. 27(12):2665-2675.
- Pesce, F. (2010). La dicotomía cuantitativa/cualitativa en el método de las ciencias geográficas. Consultado: 10 de octubre de 2018. Disponible en: <https://bit.ly/3uliEY6>
- Phillips, S.J., Dudík, M. and Schapire, R.E. (2004). A maximum entropy approach to species distribution modeling. *Proceedings of the Twenty-First International Conference on Machine Learning*. Consultado: 10 de marzo de 2019. Disponible en: http://rob.schapire.net/papers/maxent_icml.pdf
- Photis, Y.N. (2016). Disease and Health Care Geographies: Mapping Trends and Patterns in a GIS. *Health Science Journal*. 10:1–8.
- Ponder, W.F., Carter, G.A., Flemons, P. and Chapman, R.R. (2001). Evaluation of museum collection data for use in biodiversity assessment. *Conservation Biology*. 15:648–657.
- Potts, S.G., Vera, I.F., Hien, T.N., Aizen, M.A., Biesmeijer, J.C., Breeze, T.D., Dicks, L.V., Garibaldi, L.A., Hill, R., Settele, J. and Vanbergen, A.J. (2016). Safeguarding pollinators and their values to human well-being. *Nature*. 540:220–229.
- Rivera-Martínez, R., Ramírez-Davila, J.R., Martínez-Quiroz, M. and González-Huerta, A. (2020). Spatial modeling of *Bactericera cockerelli* Sulc. nymphs on husk tomato (*Physalis ixocarpa* Brot.) using of geostatistical technique. *Biotecnia*. 22:142–152.
- Robinet, C., Darrouzet, E. and Suppo, C. (2018). Spread modelling: a suitable tool to explore the role of human-mediated dispersal in the range expansion of the yellow-legged hornet in Europe. *International Journal of Pest Management*. 65:258–267.
- Rojas-Salazar, T. (2005). Epistemología de la Geografía: una aproximación para entender esta disciplina. *Terra Nueva Etapa*. 21:141–162.
- Rortais, A., Arnold, G., Dorne, J.L., More, S.J., Sperandio, G., Streissl, F., Szentes, C. and Verdonck, F. (2017). Risk assessment of pesticides and other stressors in bees: Principles, data gaps and perspectives from the European Food Safety Authority. *Science of the Total Environment*. 587:524–537.
- Royle, J.A., Chandler, R.B., Yackuli, C. and Nichols, J.D. (2012). Likelihood analysis of species occurrence probability from presence-only data for modelling species distributions. *Methods in Ecology and Evolution*. 3:545–554.
- Safni, I., Subandiyah, S. & Fegan, M. (2018). Ecology, Epidemiology and Disease Management of *Ralstonia solanaceae* in Indonesia. *Frontiers in Microbiology*. 9:419.
- SENASICA-SA. (2020). Análisis de riesgo rápido sobre la probabilidad de ingreso a México del avispón gigante asiático (*Vespa mandarinia*) a partir de la presencia del espécimen en Estados Unidos y Canadá. Dirección General de Salud Animal. Consultado: 10 de octubre de 2018. Disponible en: <https://bit.ly/3ag5GnB>
- SIAP-SADER. (2018). Producción Agrícola. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Acciones y Programas. Consultado: 10 de octubre de 2018. Disponible en: <https://bit.ly/3NE6IHW>

- Smith-Pardo, A.H., Carpenter, J.M. & Kimsey, L. (2020). The diversity of hornets in the genus *Vespa* (Hymenoptera: Vespidae), their importance and interceptions in the United States. *Insect Systematics and Diversity*. 4:2.
- Statista. (2021) Global No. 1, Business. Data Platform. Consultado: 10 de octubre de 2018. Disponible en: <https://www.statista.com/search/?q=bananas>
- Stockwell, D.R.B. and Peterson, A.T. (2002). Effects of sample size on accuracy of species distribution models. *Ecological Modelling*. 148:1–13.
- Tapia-Rodríguez, A., Ramírez-Dávila, J.F., Figueroa-Figueroa, D.K., Salgado-Siclan, M.L. and Serrato-Cuevas R. (2020). Spatial analysis of anthracnose in avocado cultivation in the State of Mexico. *Mexican Journal of Phytopathology*. 38:132–145.
- Valera-Bernal, J. (2012). Los principios del método geográfico. Consultado: 10 de abril de 2019. Disponible en: <https://bit.ly/3agri3u>
- Yanagawa, Y., K. Morita, T. Sugiura, Y. Okada. (2007). Cutaneous hemorrhage or necrosis findings after *Vespa mandarinia* (wasp) stings may predict the occurrence of multiple organ injury: A case report and review of literature. *Clinical Toxicology*. 45:803–807.

CAPÍTULO 6. MODELADO ESPACIAL FITOSANITARIO DEL CANCRO DE LOS CÍTRICOS (*Xanthomonas citri* p.v. *citri* EN LA PLANICIE COSTERA DEL GOLFO EN LA REPÚBLICA MEXICANA⁹

Resumen

El cancro de los cítricos se considera una de las principales enfermedades bacterianas que ponen en riesgo la industria cítrica mundial, ya que ocasiona afectaciones que restringen directamente el comercio del fruto por el daño asociado a la defoliación, caída prematura y manchado de los mismos. Durante 2019, el Servicio de Inspección de Sanidad Animal y Vegetal (APHIS, por su siglas en inglés) expandió su área bajo cuarentena al Sur de Estados Unidos en San Benito y Brownsville, Texas, muy cercana al límite internacional. En México, esta enfermedad se considera una plaga reglamentada que puede ocasionar pérdidas económicas en cultivos hospedantes, con repercusiones directas a la producción cítrica que aportan 2,78% del producto interno bruto agropecuario. El objetivo de este capítulo fue estimar los patrones espaciales de riesgo fitosanitario asociado a *Xanthomonas citri* en la planicie costera del golfo en México, a través del análisis de asociación/interacción espacial que integró el ambiente favorable para patógeno, el potencial productivo de hospedantes de importancia económica y los mecanismos de dispersión (viento/luvia/temperatura). Se identificó una superficie de 37.4 mil km² con alto potencial de introducción y se encontró que 1,91% del territorio mexicano posee condiciones óptimas para su establecimiento. En conclusión, los resultados obtenidos proporcionan un sustento técnico/científico con el potencial de fortalecer la toma de decisiones ante su posible introducción y establecimiento del patógeno en la República Mexicana. Así mismo, se delimitaron 279 cuadrantes fitosanitarios prioritarios para establecer o re-direccionar estrategias operativas ante el riesgo asociado al cancro de los cítricos.

Palabras clave: *Xanthomonas citri*, análisis espacial, riesgo fitosanitario, cítricos, planicie costera del Golfo, México

Abstract

Citrus canker is considered one of the major bacterial diseases that threaten the global citrus industry, causing damage that directly restricts trade in citrus fruit through defoliation, premature fruit drop, and spotting. During 2019, the Animal and Plant Health Inspection Service (APHIS) expanded its quarantine area to the southern United States in San Benito and Brownsville, Texas, very close to the international border. In Mexico, this disease is considered a regulated pest that can cause economic losses in host crops, with direct repercussions on citrus production, which contributes 2.78% of the gross domestic product (GDP). The objective of this research was to estimate the spatial patterns of phytosanitary risk associated with *Xanthomonas citri* in the coastal plain of the Gulf of Mexico, through the analysis of spatial association/interaction that integrated: the favorable environment for the pathogen, the productive potential of economically important hosts and the dispersal mechanisms (wind/rain/temperature). An area of 37.4 thousand km² with high potential for introduction was identified and it was revealed that 1.91% of the Mexican territory has optimal conditions for its establishment. In conclusion, the results obtained provide technical/scientific support with the potential to strengthen decision making regarding the possible introduction and establishment of the pathogen in Mexico. Likewise, 279 priority phytosanitary quadrants were delimited to establish or re-direct operational strategies to address the risk associated with citrus canker.

Keywords: *Xanthomonas citri*, spatial analysis, phytosanitary risk, citrus, gulf coastal plain, Mexico

⁹ ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN PREPARADO como: Ibarra-Zapata, E., Aguirre-Salado, C.A., Loredó-Osti, C., Escoto-Rodríguez, M., Miranda-Aragón, L., Mora-Aguilera, G., González-Gómez, R., Álvarez-Castañeda, J. y Díaz-López, J. Modelado espacial fitosanitario del cancro de los cítricos (*Xanthomonas citri* p.v. *citri* en la planicie costera del Golfo de México, PARA SOMETERSE A ARBITRAJE.

6.1. Introducción

El cancro de los cítricos, *Xanthomonas citri* pv. *citri* (*X. citri*) es considerado el agente más agresivo y capaz de producir enfermedad en la mayoría de las especies de la familia de las Rutáceas entre los que desatacan la lima mexicana (*Citrus aurantifolia*), naranjo dulce (*Citrus sinensis*) y la toronja (*Citrus paradisiaca*), así como los híbridos utilizados como pie de injerto (Graham *et al.*, 2004).

X. citri es originario del continente asiático, en América mantiene un estatus presente en: Islas Vírgenes Británicas, Martinica, Antillas Holandesas, Estados Unidos de América (Florida, Luisiana, Texas), Argentina, Bolivia, Brasil (Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraná, Rio Grande do Sul, Roraima, Santa Catarina, Sao Paulo), Paraguay y Uruguay (CABI, 2020).

Las primeras incursiones en Norteamérica asociadas a movimiento de material vegetativo enfermo ocurrieron en la costa este de E.U.A y se remontan a 1900. Sin, embargo en 1994 se registró una cepa endémica con origen en el estado de Florida (*X. citri*-Tipo A), la cual se encuentra ampliamente distribuida en la región citrícola (Skaria y Da Graça, 2012).

El agente causal de *X. citri* sobrevive en condiciones cálidas húmedas y requiere de un hospedero para sobrevivir en un ambiente natural. Es una bacteria aeróbica que ocasiona defoliación severa, muerte regresiva de ramas y caída prematura de frutos, puede ocurrir durante todo el año afectando plántulas y árboles jóvenes. El medio idóneo de su dispersión (corta y larga distancia) es por la asociación de condiciones térmicas óptimas (28–30°C), lesiones en la planta, agua libre en la superficie del follaje y el viento como agente de movilización del inóculo (SENASICA, 2019).

Durante 2013, se reportó un brote en cítricos ornamentales en Nueva Orleans, Luisiana. Posteriormente, en octubre de 2015 se detectó en lima mexicana en Rancho Viejo, Texas, y en septiembre de 2020, se detectó en su variante Wellington “*Xac-Aw*” en una zona rural ubicada en el ejido El Sabino, en Matamoros, Tamaulipas. Lo que permite establecer la hipótesis que regionalmente existen condiciones para que el inóculo pueda establecerse en Planicie Costera del Golfo (PCG), incluso dispersarse hacia áreas citrícolas de importancia económica en México.

En años recientes el análisis espacial se ha utilizado como estrategia de apoyo al Análisis de Riesgo de Plagas (ARP). Por ejemplo, en Estados Unidos contribuyó al manejo de problemas fitosanitarios, al fortalecer los programas de detección oportuna de plagas y enfermedades exóticas (Magarey *et al.*, 2011). El ARP se considera una herramienta de comunicación que coadyuva en la determinación del arribo, establecimiento y dispersión de especies invasoras (Venette *et al.*, 2010). Incluso, de acuerdo con Nakato *et al.* (2016), este enfoque posee el potencial de proporcionar información tangible para tomadores de decisiones.

El componente espacial se ajusta al marco epidemiológico del patógeno/hospedante/ambiente, identificando los umbrales de idoneidad (Otten *et al.*, 2004), lo que posibilita caracterizar áreas o superficies con cierto nivel de aptitud a través de una cobertura de datos espacial que permite delimitar territorialmente las superficies en riesgo fitosanitario (RF) (Nicol *et al.*, 2017).

México se considera el segundo exportador mundial de limón con el 12,29% del valor de las exportaciones mundiales, el tercer lugar como productor mundial de toronja, y además, la naranja se considera el cultivo perenne con mayor extensión territorial en la república mexicana (SAGARPA, 2019). Por lo que la posible introducción y establecimiento de *X. citri* es una

amenaza seria para la citricultura mexicana, ya que puede traer afectaciones directas a la producción y rendimiento.

El objetivo de este capítulo fue modelar los patrones espaciales del RF asociado al cancro de los cítricos en la PCG en territorio mexicano, para proporcionar los insumos técnico/científicos que permitan fortalecer o re-direccionar los programas de actuación o contención de *Xanthomonas citri* ante su posible establecimiento o dispersión en México.

6.2. Región de estudio

La PCG corresponde a la franja territorial adyacente al litoral del Golfo de México con una anchura que oscila a no más de 200 km, caracterizada por mantener altitudes menores o próximas a los 1.000 m.s.n.m., definiendo una región delimitada por la Sierra Madre Oriental (SMO). Se extiende por parte de los estados de Tamaulipas, Nuevo León, San Luis Potosí y norte de Veracruz hasta el eje volcánico transversal, así como la parte baja de la vertiente de la SMO hasta las porciones costeras de Veracruz y Tabasco (SEMARNAT-CONANP, 2019) (Figura 6.1). De acuerdo con el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), esta región aporta una superficie sembrada de 382.543 ha, equivalentes al 68% de la superficie nacional de cítricos, considerados estratégicos por su aporte a la economía nacional (SIAP, 2019).

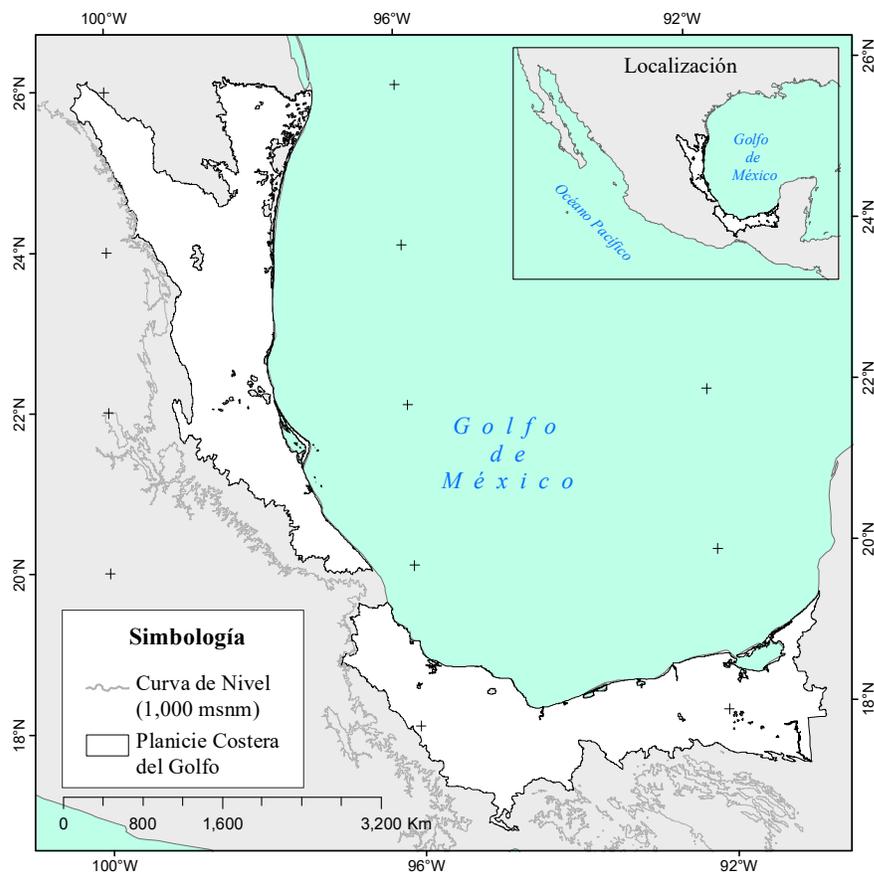


Figura 6.1 Localización de la Planicie Costera del Golfo. Fuente: SEMARNAT-CONANP 2020; INEGI, 2010.

6.3. Materiales y métodos

La estimación de patrones espaciales del RF asociados a cancro de los cítricos se desarrolló a través de la incorporación de métodos y técnicas propias de la geografía, que incluyen al análisis espacial *i.e.*, evaluación multi-criterio (MCDA por sus siglas en inglés). El análisis epidemiológico se estructuró bajo criterios del ARP de la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria (CIPF).

Esto permitió caracterizar e integrar los criterios de aptitud del patógeno/hospedante/ambiente, obteniendo un modelo cartográfico que determinó territorialmente el RF en el posible establecimiento y dispersión de *X. citri* en la PCG. En complemento, bajo este enfoque se determinaron áreas específicas para implementar o re-direccionar estrategias operativas, conforme a los diferentes niveles de RF obtenidos en los denominados cuadrantes fitosanitarios prioritarios (CFP).

Como primer criterio en la posible movilización del inóculo (C_1), el modelado geoespacial integró la asociación viento, lluvia y temperatura, definido por medio de las coberturas espaciales de eventos meteorológicos extremos (EME) ocurridos entre 2015 y 2018 en el Atlántico y Caribe, tomadas del *National Center Hurricane* (NHC, 2019). La región de EME se considera un área adyacente de la PCG en México, y se puede caracterizar como una superficie con el potencial de establecimiento y dispersión del inóculo al considerar las detecciones más recientes del patógeno en el sur de Texas y Noroeste de México señaladas por Da Graça *et al.* (2017).

En complemento al C_1 , se creó un diseño de series temporales interrumpidas (DSTI) bajo la modalidad espacial mediante la superposición cartográfica que permitió la combinación de coberturas con una capa resultante que conjuntó los atributos de entrada (Jaime *et al.*, 2011), revelando la valoración e identificación de patrones espacio-temporales de cambio (Escudero y Vallejo, 2000). Involucró la frecuencia, magnitud y áreas de influencia cronológicas de EME, que de acuerdo con León-Álvarez *et al.* (2017), puede fortalecer estudios epidemiológicos, particularmente en los ARP.

El DSTI se creó espacialmente mediante operaciones por atributos temáticos mediante el operador “OR”, para obtener la estructuración del espacio relacional mediante localizaciones, distancias y flujos. De acuerdo con Fotheringham y Rogerson (2014), este método posibilita caracterizar las coincidencias encontradas al comparar el comportamiento espacio-temporal de un fenómeno en un territorio. El DSTI involucró: 1) trayectorias de EME, 2) nodos de cambio en condición del fenómeno y 3) áreas de influencia del viento, como agentes que potencializan el riesgo (Karaye *et al.*, 2019), y la posible dispersión del inóculo, considerando al espacio geográfico como unidad de análisis (Figura 6.2).

Como segundo criterio (C_2) se estimó el modelado de distribución potencial, que consideró 183 ubicaciones de árboles positivos a *X. citri* ocurridas en el sur de Texas (Da Graça *et al.*, 2017). Dichos insumos fueron sometidos a un proceso de georreferencia, asignando su localización definida en el sistema de coordenadas *World Geodetic System 1984* (WGS84 por sus siglas en inglés), lo que involucró obtener las dimensiones: latitud/longitud/altitud. Las ubicaciones sirvieron como campos de entrenamiento, que por máxima entropía y asociado al componente ambiental identificaron las condiciones semejantes a los sitios donde se registró la especie (Philips *et al.*, 2017).

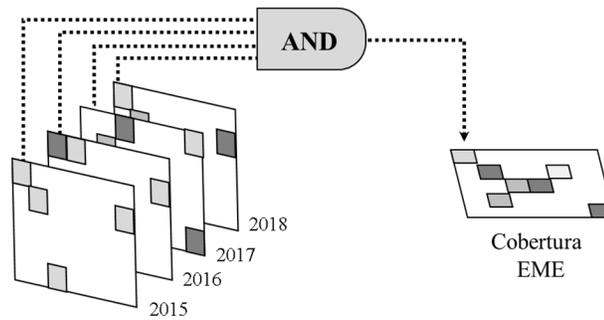


Figura 6.2 Diagrama conceptual de la asociación espacial entre las coberturas de Eventos Meteorológicos Extremos (EME) ocurridos en el Océano Atlántico y Mar Caribe entre 2015 y 2018.

El modelo de distribución potencial involucró un proceso de interacción espacial entre los sitios de presencia del patógeno respecto a 19 variables macro ambientales asociadas a temperatura y precipitación de la base global WorldClim versión 2 con una resolución de 1 km², calculados a partir de datos climáticos mensuales promedio del periodo 1970-2000 (Cuadro 6.1). Lo que permitió caracterizar el territorio conforme a las condiciones que ambientalmente favorecen a *X. citri*. Según Pitt *et al.* (2009), delimitando la distribución potencial conforme a la similitud climática.

De acuerdo con Philips y Dudik (2008), la estimación de la distribución potencial, en este caso (C_2) se fundamenta a partir de un vector \mathbf{z} de componentes $\{f_j\}$ donde $j=1, \dots, n$ y los valores de las variables ambientales, es decir, que $y: x(\mathbf{z})$, siendo \mathbf{z} las condiciones ambientales en la ubicación x . Donde, la probabilidad (P) a partir de la presencia toma la forma de una regresión logística con la interceptada estimada por la entropía (q_λ) en función de las variables macro ambientales en una determinada ubicación, reflejado en la siguiente ecuación:

$$C_2 = \frac{\exp(\sum_{j=1}^n \lambda_j \cdot f_j(x(\mathbf{z})))}{Z_\lambda}$$

El modelado de ambiente favorable se realizó en el software MaxEnt v3.3.3e. Se inició mediante el uso de una semilla aleatoria y se utilizó el 75% de los registros de ocurrencia como campos de entrenamiento, mientras que el resto de los registros se utilizó para la validación del modelo conforme a los criterios definidos por Fielding y Bell, (1997). Se especificó un número de 10,000 puntos como “background”, y se ejecutó de forma interactiva para generar 10 corridas y un modelo final promedio, el cual se evaluó mediante el análisis del área bajo la curva (AUC, por sus siglas en inglés) conforme a las especificaciones metodológicas de Phillips *et al.* (2006).

Como tercer criterio (C_3) se estimó el potencial productivo de los cítricos (PPC), a través de la asociación espacial de las coberturas de potencial productivo (PP) que permitió obtener una cobertura que definió territorialmente áreas con aptitud agroecológica para establecer nuevas plantaciones cítricas. Este procedimiento involucró una combinación de todos los factores de entrada (PP alto y PP medio), lo que permitió obtener las ubicaciones óptimas para establecer cultivos cítricos mediante una reclasificación de cinco rangos de PPC (Figura 6.3): alto/alto, alto, alto/medio, medio y medio/medio.

Cuadro 6.1 Variables macroambientales para estimar la distribución potencial de *X. citri*.

Clave	Variable	Unidades
BIO1	Temperatura media anual	
BIO2	Rango medio diario (t _{máx} -t _{mín})	
BIO3	Isotermalidad (BIO2/BIO7*100)	
BIO4	Temperatura estacional (S*100)	
BIO5	Temperatura máxima del mes más cálido	°C
BIO6	Temperatura mínima del mes más frío	
BIO7	Rango de temperatura anual (BIO5-BIO6)	
BIO8	Temperatura media del mes más húmedo	
BIO9	Temperatura media del mes más seco	
BIO10	Temperatura media del trimestre más cálido	
BIO11	Temperatura media del trimestre más frío	
BIO12	Precipitación anual	
BIO13	Precipitación del mes más húmedo	
BIO14	Precipitación del mes más seco	
BIO15	Precipitación estacional (Coeficiente de variación)(%)	mm
BIO16	Precipitación del trimestre más húmedo	
BIO17	Precipitación del trimestre más seco	
BIO18	Precipitación del trimestre más cálido	
BIO19	Precipitación del trimestre más frío	

Fuente: Bioclimatic variables. WorldClim. En línea <https://www.worldclim.org/data/bioclim.html>

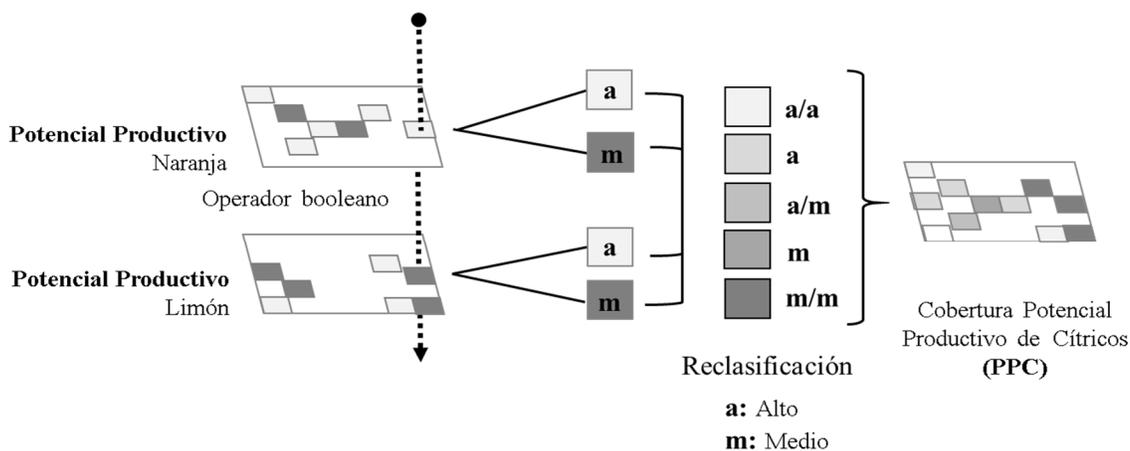


Figura 6.3 Diagrama conceptual de la superposición de las coberturas de Potencial Productivo de Cítricos “PPC” (Naranja y Limón).

La obtención de la cobertura del C_3 se basó en la técnica de combinación de atributos espaciales, que de acuerdo con Buzai, (2015), es un método que ha demostrado ser factible para determinar una localización potencial. Este tipo de enfoques posibilitan de manera directa aportar en estudios que involucran la distribución espacial en una escala regional y en buena medida pueden contribuir a la toma de decisiones (Celemin, 2009).

Con los resultados de la modelación de los C_1 , C_2 y C_3 se llevó a cabo la estimación de los patrones espaciales del RF de *X. citri* mediante la asociación e interacción espacial de los espacios relacionales. Implicó una combinación de los geodatos, bajo los principios geográficos de localización, distancia, conexión y estructura como elementos fundamentales en el análisis espacial. Dichos espacios relacionales fueron integrados mediante la MCDA.

De acuerdo con Keisler y Linkov, (2020), la MCDA sintetiza información para comparar y priorizar alternativas, posibilitando la selección de estrategias de mitigación. El proceso de MCDA se realizó por medio del método “*Weighted Overlay*”, que involucró la superposición de coberturas y la ponderación de criterios según su importancia, y fueron estructurados mediante una asignación de pesos (W_j). Este procedimiento permite orientar en la toma de una decisión con múltiples criterios asignando pesos específicos que intervienen en una evaluación de las diferentes alternativas, en función de la importancia relativa que tenga cada criterio (Chica-Salgado, 2020).

El modelo cartográfico de RF de *X. citri* en la PCG se clasificó en seis rangos (muy alto, alto, medio, bajo, muy bajo y mínimo). En complemento, se determinó la ubicación de clúster o agrupamientos delimitados por CFP, conceptualizándose como un proceso de priorización espacial por proximidad y extensión de superficie según el RF. De acuerdo con MacLeod y Pietravalle, (2017), este procedimiento permite agrupar expresiones de magnitud, es decir, se asignó un límite artificial a las superficies agrupadas geoestadísticamente, para cada nivel de RF de *X. citri*, mediante la herramienta “*Convex envelope*”.

El valor de decisión para la MCDA del RF de *X. citri* se asignó en virtud de tres criterios (C_n : 3), conforme el nivel importancia según el componente epidémico de la enfermedad, representado en el esquema de la Figura 4. El mayor nivel de importancia 2.9 se asignó al (C_1) debido a que involucró la distribución potencial del patógeno, en un nivel intermedio de 1.9 se otorgó al (C_3) que integró las características agroecológicas óptimas de hospedantes y el menor nivel con 1.2 fue asignado al (C_2) ya que, involucró (viento/lluvia/temperatura) determinantes en la dispersión del inóculo.

De manera regional, la distribución potencial de *X. citri* reveló áreas ambientalmente óptimas en la PCG desde Florida EUA hasta la Península de Yucatán definiendo una distancia aproximada de 3,503 km por línea de costa. Sin embargo, en el noreste de la República Mexicana, lo que incluye a Tamaulipas y Nuevo León (representado en tonalidades cálidas de rojo a naranja), se identificaron 221.800 km² con condiciones ambientales semejantes a los brotes ocurridos en el sur de Texas en E.U.A.

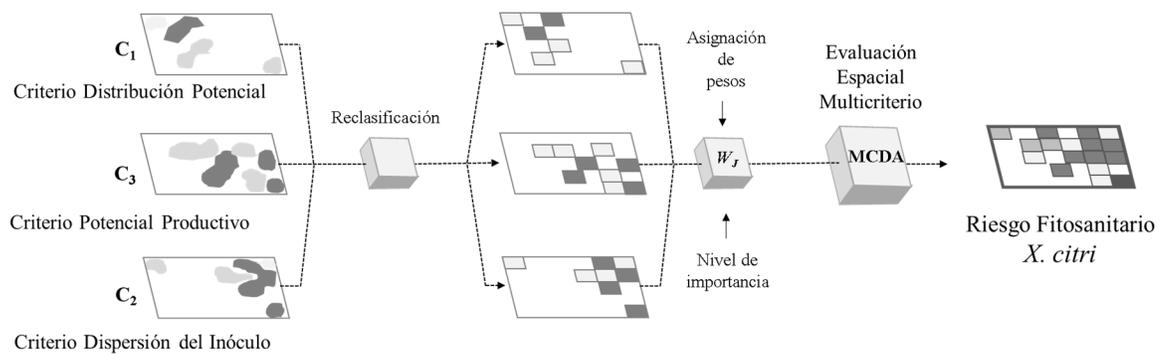


Figura 6.4 Diagrama conceptual de la Evaluación Espacial Multicriterio (MCDE) de los criterios (C_n) que determinan los patrones espaciales del Riesgo Fitosanitario asociado al Cancro de los Cítricos *Xanthomonas citri* pv. *citri*.

Una vez asignado el nivel de importancia a cada criterio, se determinaron las ponderaciones con base en el siguiente modelo.

$$2.9 X + 1.9 X + 1.2 X = 1$$

donde X es el valor de la ponderación de una unidad respecto a la suma total de las ponderaciones de los criterios. La ecuación se iguala a 1 para que el total de las ponderaciones sumen la unidad. Resolviendo la ecuación, se tiene que $X = 0.166$. Con ello, se lograron definir los pesos (W_j) en la estimación de la MCDA, representados en el Cuadro 6.2.

Cuadro 6.2 Asignación de pesos (W_j) en la estimación del riesgo fitosanitario de cancro de cítricos en la PCG en México.

C_n	Criterio	Estimación del factor de ponderación con base en 1	W_j
C_1	Distribución potencial de <i>X. citri</i>	$2.9 x = 2.9 * 0.166$	0.48
C_2	Dispersión del inóculo (viento/lluvia/temperatura)	$1.2 x = 1.2 * 0.166$	0.20
C_3	PPC (hospedantes)	$1.9 x = 1.9 * 0.166$	0.31

6.4. Resultados

Considerando los resultados de la modelación, e identificando el ambiente favorable y proximidad geográfica a las detecciones de *X. citri*, señaladas por Da Graça *et al.* (2017), la porción norte de la PCG se puede considerar una región con aptitud alta, favoreciendo la posible dispersión y establecimiento del inóculo, lo cual, se representa en la Figura 6.5 en tonalidades cálidas (amarillo a rojo). Aquí se cuenta con condiciones térmicas que favorecen la introducción, establecimiento o dispersión del inóculo, además de ser adyacente a la zona de cuarentena al sur de Texas. Mientras que la porción sur de la PCG presenta superficies con aptitud media en tonalidades de verde/amarillo y aptitud baja representada en colores de azul/verde.

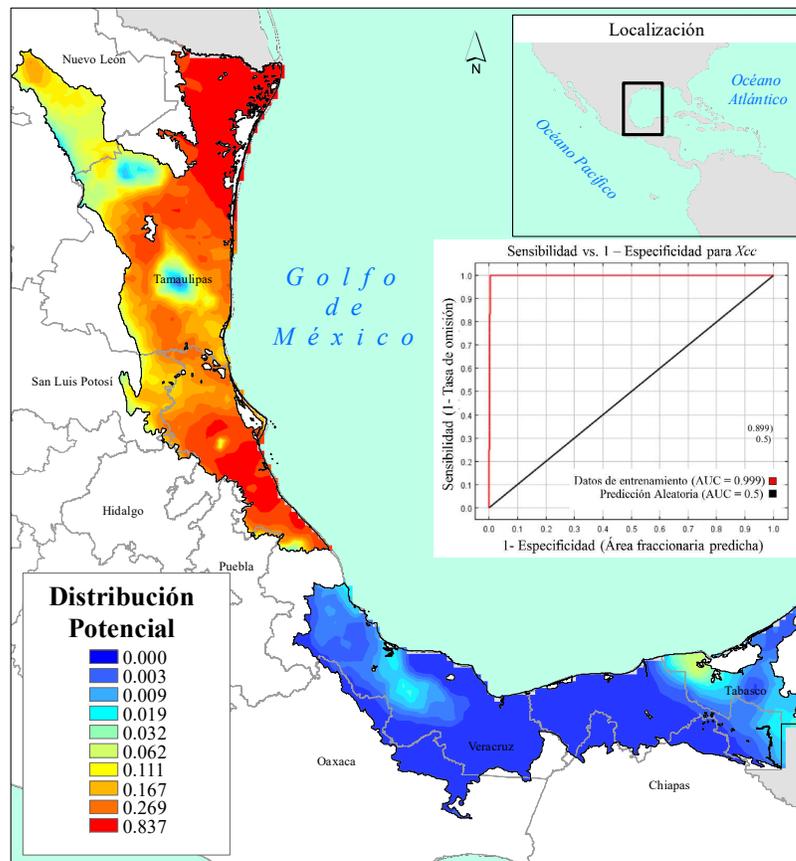


Figura 6.5 Modelo Cartográfico de Distribución Potencial del Cancro de los Cítricos *Xanthomonas citri* pv. *citri* estimado por máxima entropía en la Planicie Costera del Golfo en México. Fuente: Elaboración propia a partir de datos georreferenciados de Da Graça *et al.* (2017) y el método de Máxima Entropía y datos climáticos.

La caracterización del PPC logró definir territorialmente cinco categorías de referencia: 1) alto/alto, 2) alto, 3) alto/medio, 4) medio, 5) medio/medio. Esta clasificación permitió identificar que 9.09% de la superficie nacional cuenta con características agroecológicas que potencializan incrementar cultivos cítricos de importancia económica (naranja y limón). Es decir, cuenta con las condiciones óptimas o sub-óptimas necesarias para la siembra de cultivos susceptibles a la enfermedad y hospedantes de *X. citri*.

El modelo de PPC determinó que existen 37.416,77 km² que poseen características que favorecen en cierta medida el establecimiento de nuevas plantaciones de cítricos por requerimientos edáficos y climáticos (SAGARPA, 2019). Sin embargo, priorizando por extensión territorial el PP alto/alto (color marrón oscuro) representó el 78,79% de la superficie total distribuido en la porción central de la PCG, mayormente en la parte más estrecha próxima a las Sierras de Pamoranes y de San Carlos y con menor proporción hacia la Sierra de los Tuxtlas. El PP alto/ medio (tonalidad anaranjada) ocupa el 9,92% de la superficie total y se distribuyó en la porción sur de la PCG (Figura 6.6).

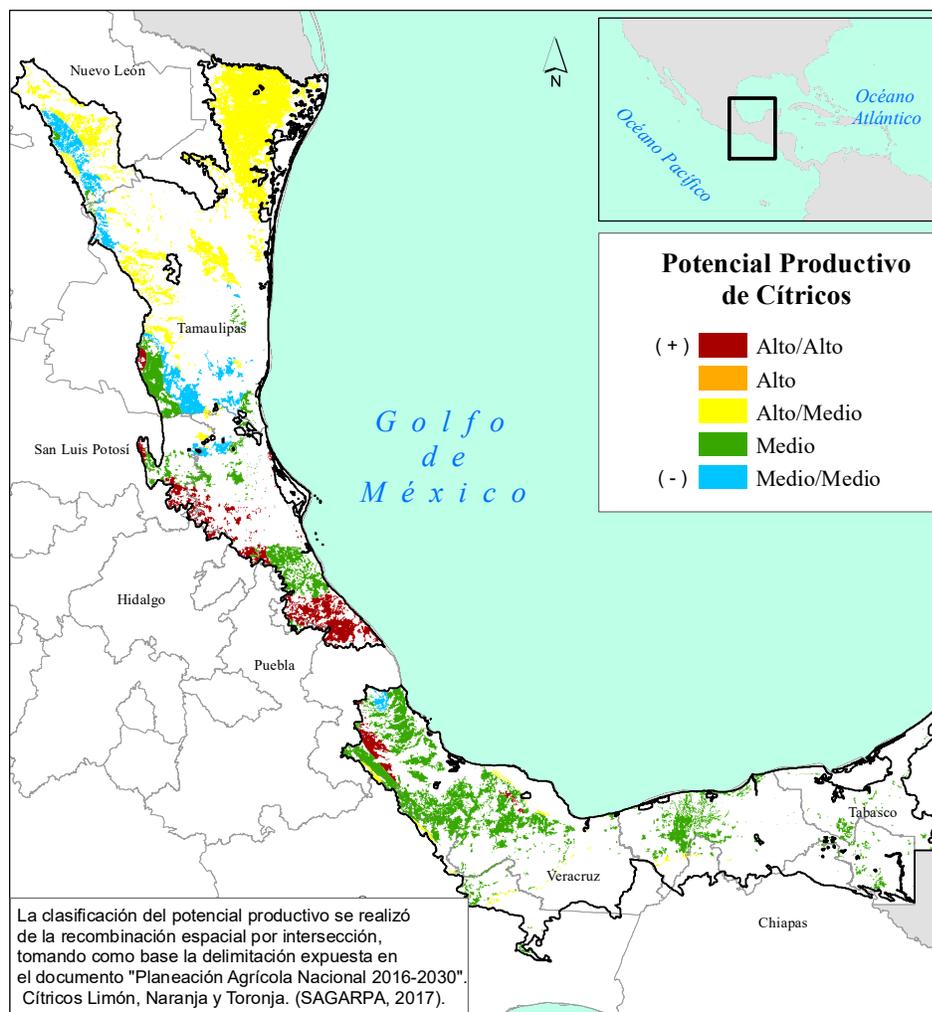


Figura 6.6. Modelo Cartográfico de Potencial Productivo de Cítricos (PPC) “limón/naranja”, en la Planicie Costera del Golfo en México.

El PP medio (color amarillo) territorialmente ocupó el 8.81%, y se distribuyó en la porción norte de la PCG en Tamaulipas, y en la Huasteca norte de San Luis Potosí y Veracruz con menor densidad en el sur de Veracruz. El PP medio/medio (color verde) solamente representó el 2.17% de la superficie estimada y se distribuyó en la porción norte de la PCG hacia las altitudes más altas bordeando la SMO. Finalmente el PP alto (color rojo) representa menos del 1% de la superficie definida, específicamente 3,94 ha, dispersas al límite altitudinal más alto de la PCG (Figura 6.6).

La caracterización de áreas con potencial de dispersión asociada a viento/lluvia permitió analizar de manera conjunta un total de 62 EME en la región de estudio, destacando que el año más activo en cuanto a eventos desarrollados en el Golfo de México y Caribe, fue el periodo entre Junio y Octubre de 2017, con presencia registrada de meteoros clasificados como depresiones tropicales (DT) hasta huracanes (H) con categoría 3, con vientos oscilantes de 63 hasta 209 km/h que espacialmente generaron corrientes de viento en la PCG desde el Istmo de Tehuantepec en México hasta la Costa Este de EUA en Florida.

La superposición y combinación de atributos asociados a la dimensión y alcance de los EME permitió obtener una cobertura resultante que integró la superficie en riesgo de dispersión natural caracterizando el área de influencia con el potencial de favorecer la movilización de *X. citri*. Se identificó un área de RF del paralelo 22 a la costa norte del Istmo de Tehuantepec y Península de Yucatán en México, así como la Costa Este de E.U.A de Florida hasta Texas, cabe resaltar que el noreste de México Tamaulipas, Nuevo León y norte de Veracruz fue influenciado por los vientos desarrollados en los territorios adyacentes en la zona de probable dispersión secundaria (Figura 6.7).

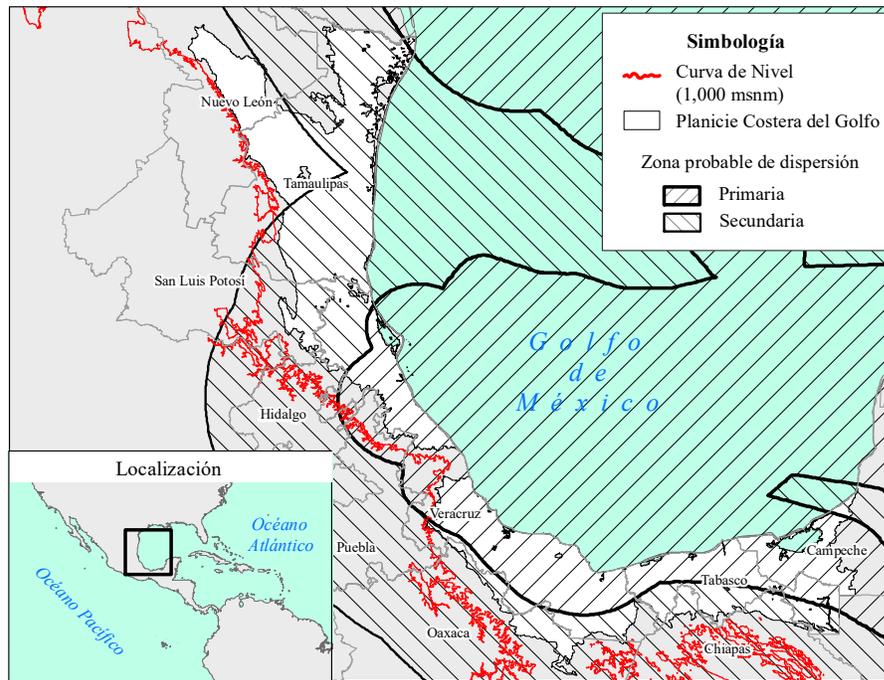


Figura 6.7 Modelo Cartográfico de Dispersión Potencial del Inóculo asociado a los Eventos Meteorológicos Extremos (EME) ocurridos en el Océano Atlántico y Mar Caribe entre 2015 y 2018. Fuente: Coberturas espaciales de Eventos Meteorológicos Extremos del National Center Hurricane, (2015 - 2018).

El modelado geoespacial reveló que el 19.47% de la extensión territorial de la PCG cuenta con cierto nivel de RF (muy alto, alto, medio, bajo, muy bajo o mínimo), que puede favorecer el establecimiento o dispersión de *X. citri*, es decir, existen 32.090 km² donde se presentan condiciones óptimas para la proliferación del inóculo. La estimación del RF asociado a *X. citri* se respaldó en los criterios epidémicos que favorecen al patógeno/hospedante definido por la ponderación asignada a los criterios.

Considerando la extensión territorial según el RF, se detectaron los siguientes patrones espaciales: en RF-alto: se clasificaron 10.383 km², el RF-muy bajo se distribuyó en 7.698 km², en RF-medio se identificó en 6.137 km², el RF-bajo solamente se ubicó en 3.781 km², el RF-muy alto se identificó solo en 3.564 km² y finalmente el RF-mínimo solo se distribuyó en 107 km². El comportamiento espacial del RF se presenta a mayor detalle en la Figura 6.8, donde presenta el porcentaje de nivel de riesgo estimado conforme su ubicación geográfica en la PCG.

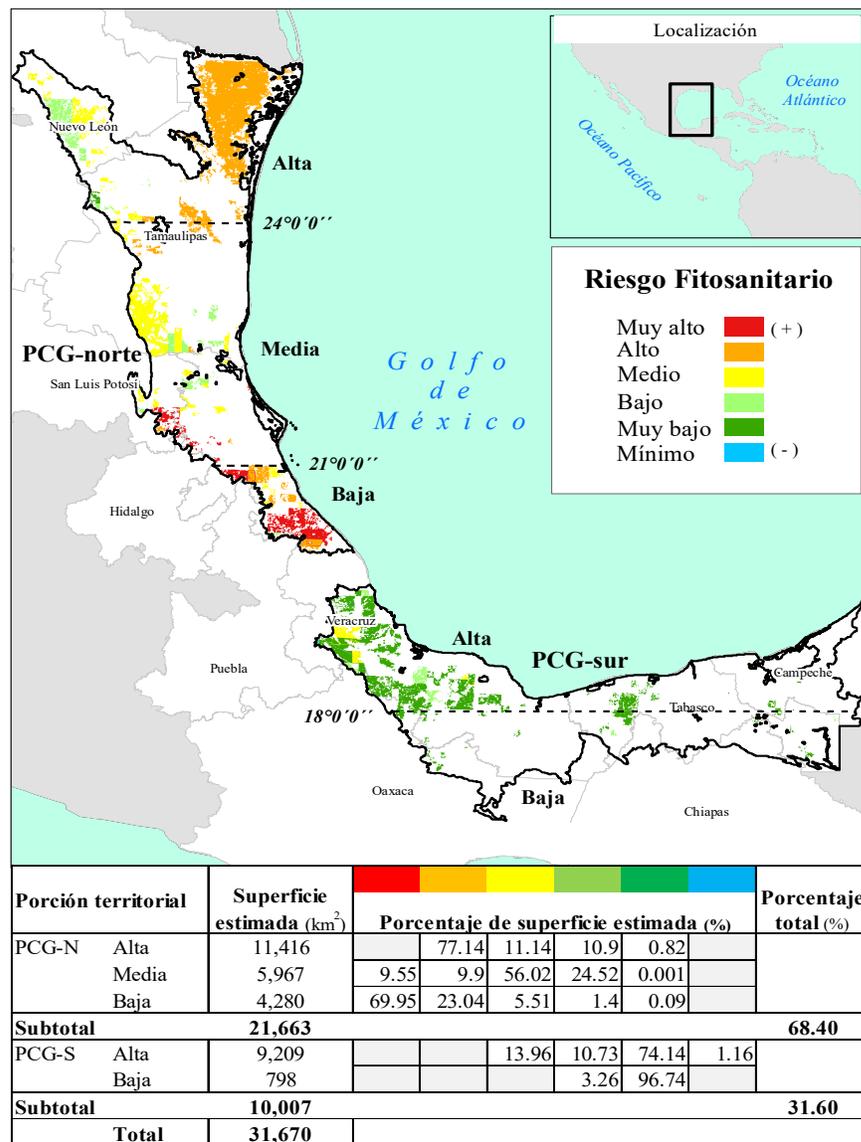


Figura 6.8 Modelo cartográfico de riesgo fitosanitario asociado al cancro de los cítricos *Xanthomonas citri* pv. *citri* en la Planicie Costera del Golfo en México.

El modelo de RF de *X. citri* permitió la identificación de 279 CFP para realizar o re-direccionar acciones de vigilancia epidemiológica fitosanitaria del patógeno en la PCG en México. El RF-muy alto presentó un agrupamiento delimitado por 25 cuadrantes próximos al paralelo 21. El RF-alto permitió delimitar 36 cuadrantes entre ellos, el de mayor extensión territorial. En RF-medio y RF-bajo se identificaron 73 y 44 cuadrantes distribuidos a lo largo de la PCG a excepción de la porción baja de la PCG-sur. Finalmente, con menores densidades y ubicadas en la PCG sur en RF-muy bajo y en RF-mínimo se caracterizan 99 y 2 CFP, respectivamente. Cabe señalar que la distribución espacial de los cuadrantes responde al componente epidémico de *X. citri*, desde una perspectiva espacial (Figura 6.9).

6.5. Discusión

Los patrones espaciales de RF asociados al comportamiento epidémico de *X. citri* permitieron delimitar territorialmente superficies en seis niveles de RF (muy alto, alto, medio, bajo, muy bajo y mínimo). Estos mapas pueden ser empleados como una herramienta que permite la colocación o redireccionamiento de estrategias operativas en la vigilancia epidemiológica fitosanitaria del cancro de los cítricos en la PCG.

Los resultados obtenidos revelan periodos de posible movilización del inóculo asociados a EME, ya que, la interacción lluvia/viento/temperatura, se potencializa con la presencia de DT, tormentas tropicales (TT) y H, siendo periodos progresivamente más efectivos dispersando el inóculo de *X. citri* a mayores distancias (Moschini *et al.*, 2014). Sin embargo, conforme al comportamiento de los nodos de cambio según la condición de los EME, el periodo más activo sucedió durante 2017, ya que el 39.94% del total de los eventos ocurridos presentó la categoría de Huracán, es decir fue un periodo que propició la interacción de precipitación y vientos de alta velocidad que posibilita favorecer la dispersión de grandes cantidades de inóculo. Lo que resulta ser un elemento epidemiológicamente factible para la dispersión del inóculo, posibilitando la ocurrencia y dispersión a corta, mediana y gran distancia (Mora-Aguilera *et al.*, 2014). Los resultados temporales pueden actualizarse al integrar información de EME recientes, lo que origina un modelo de posible dispersión actual y por ende, resultados más aproximados a la realidad del comportamiento de los factores naturales que potencializan la movilización del inóculo.

EFSA (2014) señaló que el establecimiento de la enfermedad puede ser de moderado a probable, si existen las condiciones ambientales para hospedantes primarios de *X. citri*. Al respecto, la metodología desarrollada permitió descubrir territorios prioritarios para vigilancia epidemiológica de la enfermedad tanto por extensión, como por nivel de RF. En este sentido, el cuadrante en RF alto de mayor extensión territorial, se ubica adyacente al cauce del Río Bravo, que es el límite internacional con Texas E.U.A y muy próximo a las zonas de cuarentena del patógeno al sur de Texas señaladas por USDA (Da Graça *et al.*, 2017). Aludiendo al principio de proximidad geográfica, y dado el potencial epidémico de esta zona, ésta sería una región prioritaria para vigilancia epidemiológica. Por ello, se debe considerar como región estratégica para fortalecer las acciones de monitoreo y vigilancia a través de la colocación o redireccionamiento de áreas de exploración, plantas o puntos de observación permanentes, rutas de vigilancia e incluso, la implementación de viveros trampa.

Los resultados obtenidos revelan que la PCG-porción norte debe ser una región prioritaria para la vigilancia epidemiológica activa, ya que, incorpora un ambiente favorable para el patógeno, es decir, definida en mayor medida por factor térmico (54,7%), así como superficies territoriales con un PPC medio pero de gran extensión, siendo superficies territoriales con aptitud para los hospedantes principales de importancia económica (naranja y limón) y una región de influencia de EME donde cada año existen condiciones de viento y lluvia asociados a depresiones tropicales, tormentas tropicales y huracanes.

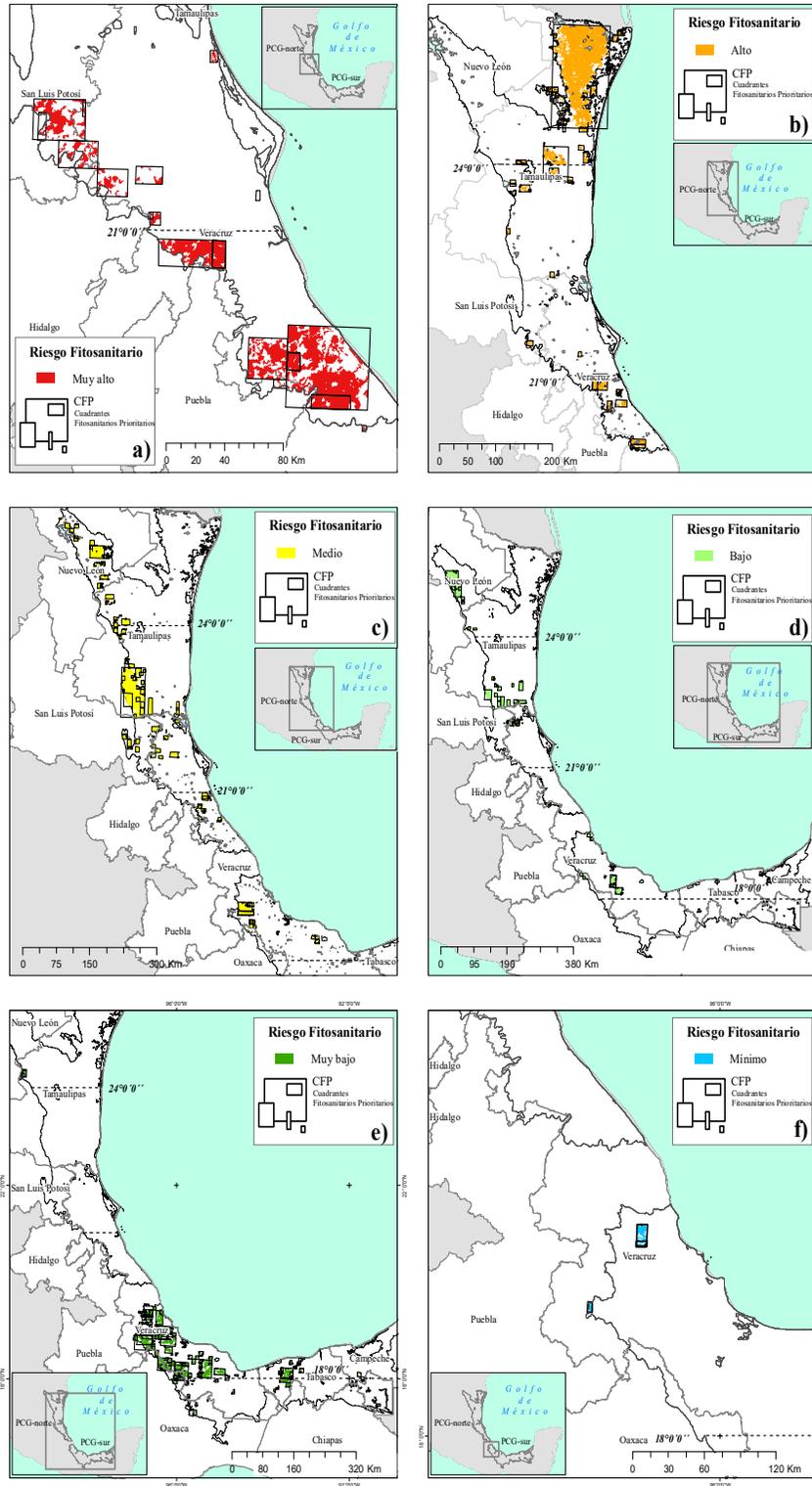


Figura 6.9 Cuadrantes prioritarios para la Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria en la PCG asociados al Riesgo Fitosanitario de *Xanthomonas citri* en México. a) Riesgo Fitosanitario muy alto, b) Riesgo Fitosanitario alto, c) Riesgo Fitosanitario medio, d) Riesgo Fitosanitario bajo, e) Riesgo Fitosanitario muy bajo y f) Riesgo Fitosanitario mínimo.

6.6. Conclusiones

El agente causal del cancro de los cítricos representa una amenaza seria para citricultura mexicana. Sin embargo, el territorio prioritario donde se deben implementar estrategias preventivas es la PCG, la cual se pueden considerar la primera zona de arribo del patógeno, puesto que es una porción territorial con alta aptitud para que se establezca, con un área aproximada de 37 mil km² con aptitud para cultivos citrícolas, y donde año con año se presentan condiciones de dispersión asociadas a EME por ser la temporada de huracanes. Estos factores influyen de manera conjunta en la expresión de síntomas, incubación y dispersión del inóculo.

El modelado espacial fitosanitario del cancro de los cítricos permitió estimar la posible zona de introducción/establecimiento del inóculo, logrando delimitar una porción territorial que abarcó el 19.47% de la superficie de la PCG, delimitada por la SMO con un límite altitudinal próximo e inferior a los 1,000 m.s.n.m. La estimación de la superficie en riesgo fitosanitario se respaldó en la MCDA y fue definida a través de una asignación de pesos (W_j) desde una perspectiva espacial conforme al componente epidémico representado mediante los criterios: (C_1) Distribución potencial del inóculo (ambiente óptimo para el patógeno), (C_2) potencial productivo de cítricos (condiciones óptimas para hospedantes primarios) y (C_3) mecanismos de dispersión (viento/lluvia/temperatura), con un valor de decisión de 0.48, 0.31 y 0.20, respectivamente.

Los resultados obtenidos indican que existen cerca de 32 mil km² en algún nivel de RF, de lo cual el 11.25% se ubicó en RF-muy alto, el 32.78% se ubicó en RF-alto, el 19.37% en RF-medio, el 11.93% en RF-bajo, el 24.30% en RF-muy bajo, y en RF-mínimo menos del 1%. El mapeo obtenido permite responder a preguntas como: ¿dónde se ubican las superficies con mayor aptitud para la introducción, establecimiento o dispersión del cancro de los cítricos en extensión de la PCG? y ¿cuáles serían las áreas prioritarias para realizar estrategias de prevención o mitigación del riesgo asociado al cancro de los cítricos? El enfoque utilizado para la estimación del RF asociado al cancro de los cítricos proporciona un sustento técnico/científico para dar soporte a la toma de decisiones incorporando la integración de diferentes disciplinas en la búsqueda de escenarios basados en enfoques de carácter transdisciplinario.

En complemento, se realizó la delimitación de los CFP, que permiten identificar por nivel riesgo y por agrupamiento de superficies prioritarias en las que se pueden establecer estrategias de vigilancia epidemiológica de una manera dirigida, favoreciendo la implementación de estrategias fitosanitarias como: parcelas o plantas centinelas, rutas de vigilancia, rutas trampeo y áreas de exploración. Se identificaron territorios prioritarios definidos por 25 CFP en RF-muy alto, 36 CFP en RF-alto, seguidos de 73 y 44 CFP en RF-medio y RF-bajo respectivamente. Finalmente, 92 y 2 CFP en RF-muy bajo y mínimo, siendo los que poseen menor aptitud para la introducción, establecimiento o dispersión de *X. citri*.

El uso del enfoque espacial para fortalecer el ARP permite dar soporte a la toma de decisiones operativas en el manejo de las acciones en el campo de la sanidad vegetal por parte de los organismos internacionales y federales, basado en investigación científica, con un sustento legal y normativo, así como una perspectiva epidémica. Particularmente, el análisis espacial fitosanitario conlleva a la generación de escenarios, y su implementación al mundo real, es decir, permite direccionar estrategias operativas conforme a superficies con cierto nivel de aptitud que puede favorecer la introducción, establecimiento o dispersión de organismos plaga que pueden ocasionar un daño a la economía y la seguridad alimentaria.

La definición de patrones espaciales de RF asociado a *X. citri* se puede considerar un insumo técnico/científico para coadyuvar en la implementación o reforzamiento de acciones o estrategias fitosanitarias preventivas, es decir, fortalecer la vigilancia epidemiológica fitosanitaria

en la redirección o colocación óptima de áreas de exploración, rutas de vigilancia y el establecimiento de plantas centinela o puntos de observación permanentes, con base en el componente epidémico del patógeno.

6.7. Literatura citada

- CABI. (2020). *Xanthomonas citri* citrus canker. Consultado: 21 de mayo de 2021. Disponible en: <https://www.cabi.org/isc/datasheet/56921>
- Canteros, B.I., Gochez, A.M., Moschini, R.C. (2017). Management of citrus canker in Argentina, a success story. *Plant Pathology Journal*. 33(5):441–449.
- Celemín, J.P. (2009). Autocorrelación espacial e indicadores locales de asociación espacial. Importancia, estructura y aplicación. *Revista Universitaria de Geografía*. 18:11–31.
- Chica-Salgado, C.A. (2020). Propuesta de un modelo matemático de programación por metas: aplicación práctica para la selección de alternativas. *NOVUM*. 2(10):115–132. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/novum/article/view/89638>
- Da Graça, V.J., Kunta-M., Park, J.W., González-M., Santillana, G., Mavrodieva, V., Duffel, N.M., Dale, J. (2017). Occurrence of a citrus canker strain with limited host specificity in South Texas. *Plant Health Progress*. 18:196–203.
- EFSA. (2014). Scientific opinion on the risk to plant health of *X. citri* pv. *citri* and *X. citri* pv. *aurantifolia* for the EU territory. *European Food Safety Authority Journal*. 12(2):3556.
- Elith, J. (2000). Quantitative methods for modeling species habitat: comparative performance and an application to Australian plants. In: Ferson, S. and Burgman, M. (Eds.). *Quantitative Methods for Conservation Biology*, pp. 39-58.
- Escudero, J.R. y Vallejo, G. (2000). Comparación de tres métodos alternativos para el análisis de series temporales interrumpidas. *Psicothema*. 12(3):480-486.
- Fielding, A.H., Bell, J.F. (1997). A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental Conservation*. 24(1):38–49.
- Fotheringham, A.S., Rogerson, P.A. (2009). The SAGE Handbook of Spatial Analysis. ISBN 978-1-4129-1082-8.
- Graham, J.H., Gottwald, T.R., Cubero, J., Achor, D.S. (2004). *Xanthomonas axonopodis* pv. *citri*: factors affecting successful eradication of citrus canker. *Molecular Plant Pathology*. 5(1).
- Jaime, E., Larín, R., Gare, E. (2011). Hacia métodos de análisis de datos espaciales raster en el nivel semántico. *Computación y Sistemas*. 15 (1): 91–106.
- Karaye, M., Thompson, C., Horney, J.A. (2019). Evacuation shelter deficits for socially vulnerable Texas residents during Hurricane Harvey. *Health Services Research and Managerial Epidemiology*. 6:1–7.
- Keisler, M.J. and Linkov, I. (2020). Use and misuse of MCDA to support decision making informed by risk. *Risk Analysis*. 41(9):1513–1521.
- León-Álvarez, A.L., Betancur-Gómez, J.I., Jaimes, F., Grisales-Romero, H. (2017). Ronda clínica y epidemiológica. Series de tiempo interrumpidas. *Iatreia*, 30(3):344–351.
- MacLeod, A. and Pietravalle, S. (2017). Communicating risk: variability of interpreting qualitative terms. *EPPO Bulletin*. 47(1):57–68.

- Magarey, R.D., Borchert, D.M., Engle, J.S., Colunga-García M., Koch, F.H., Yemshanov, D. (2011). Risk maps for targeting exotic plant pest detection programs in the United States. *EPPO Bulletin*, 41: 46–56.
- Mastin, A.J., Gottwald, T.R., Van den Bosch, F., Cunniffe, N.J., Parnell, S. (2020). Optimising risk-based surveillance for early detection of invasive plant pathogens. *PLoS Biology*. 18(10):e3000863.
- Mora-Aguilera, G., Acevedo-Sánchez, G., Calderón-Estrada, G., Flores-Sánchez, J., Domínguez-Monge, S., Baker, P. and González-Gómez, R. (2014). Epidemiological considerations of climate change on tropical crops health. *Revista Mexicana de Fitopatología*. 32: 147–167.
- Moschini, R.C., Canteros, B.I., Martínez, M.I., De Ruyver, R. (2014). Quantification of the environmental effect on citrus canker intensity at increasing distances from a natural windbreak in northeastern Argentina. *Australasian Plant Pathology*. 43:653–662.
- Nakato, G.V., Beed, F., Bouwmeester, H., Ramathani, I., Mpiira, S., Kubiriba, J., Nanavati, S. (2016). Building agricultural networks of farmers and scientists via mobile phones: case study of banana disease surveillance in Uganda. *Canadian Journal of Plant Pathology*. 38(3):307–316.
- NHC. (2019). National Hurricane Center, Data in GIS Formats. Consultado 12 marzo 2021. Disponible en: <https://www.nhc.noaa.gov/gis/>
- Nicol, S., Sabbadin, R., Peyrard, N., Chades, I. (2017). Finding the best management policy to eradicate invasive species from spatial ecological networks with simultaneous actions. *Journal of Applied Ecology*. 54:1989–1999.
- Otten, W., Bailey, D.J., Gilligan, C.A. (2004). Empirical evidence of spatial thresholds to control invasion of fungal parasites and saprotrophs. *New Phytologist*. 163:125–132.
- Phillips, S.J. and Dudík, M. (2008) Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*. 31(2).
- Phillips, S.J., Anderson, R.P., Dudík, M., Schapire, R.E., Blair, M.E. (2017) Opening the black box: an open-source release of Maxent. *Ecography*. 40 (7).
- Phillips, S.J., Anderson, R.P., Schapire, R.E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*. 190:231–259.
- Pitt, J.P.W., Worner, S.P., Suarez, A.V. (2009). Predicting Argentine ant spread over the heterogeneous landscape using a spatially explicit stochastic model. *Ecological Applications*. 19:1176–1186.
- SAGARPA. (2019). Planeación Agrícola Nacional 2016-2030. Cítricos limón, naranja y toronja mexicanos. Consultado: 2 de mayo de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3bQ7IAZ>
- SENASICA. (2019). Cancro de los cítricos (*Xanthomonas citri*). Dirección General de Sanidad Vegetal - Programa de Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria. Ciudad de México. Ficha Técnica No. 33. 19 p. Consultado: 10 de diciembre de 2020. Disponible en: <https://bit.ly/3Rk9Pb9>
- SEMARNAT-CONANP. (2019). Región Planicie Costera y Golfo de México. Consultado: 4 de febrero de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3RbelID>
- Skaria, M. and Da Graça, V.J. (2012). History lessons towards proactive citrus canker efforts in Texas. *Subtropical Plant Science*. 64:29–33.

- Sulzbach, M., Pedroso de Oliveira, R., Girardi, E.A., Bassanezi, R.B., Ferraz-Laranjeira, F., Schwarz, S.F. (2017). Risk analysis of introduction and spread of huanglongbing in citrus groves in Rio Grande do Sul, Brazil. *Tropical Plant Pathology*. 43:49–58.
- Venette, R.C., Kritikos, D.J., Magarey, R.D., Koch, F.H., Baker, R.H.A., Worner, S.P., Raboteaux, N.N.G., McKenney, D.W., Dobesberger, E.J., Yemshanov, D., De Barro, P.J., Hutchinson, W.D., Fowler, G., Kalaris, T.M., Pedlar, J. (2010). Pest risk maps for invasive alien species: A roadmap for improvement. *BioScience*. 60(5):349–362.

CAPÍTULO 7. MODELADO DEL TIEMPO FISIOLÓGICO DE *Ceratitís capitata* EN TERRITORIOS ESTRATÉGICOS DE LATINOAMÉRICA¹⁰

Resumen

La mosca del Mediterráneo es una plaga de interés cuarentenario que puede afectar de manera directa la producción y comercialización de frutas y hortalizas en el mundo. Es una especie con un comportamiento polífago y tiene un elevado número de hospederos susceptibles tanto silvestres como de importancia económica. Actualmente, en Centroamérica y Sur de México existen territorios estratégicos en los que se mantiene un monitoreo permanente de la plaga, los cuales se consideran una barrera en el avance de la plaga hacia Norteamérica. La utilización de sensores remotos en el área de la sanidad vegetal tiene el potencial de aportar información que sirva de base para la toma de decisiones en el establecimiento de estrategias preventivas de mitigación del avance de la plaga. Este enfoque se puede considerar una herramienta geotecnológica que permite coadyuvar en los procesos de monitoreo y vigilancia de riesgos fitosanitarios, a través del análisis de información ambiental, específicamente del componente térmico, puesto que la temperatura es un factor esencial para los estados inmaduros y adultos de la mosca del Mediterráneo. El objetivo del presente estudio fue realizar el cálculo del tiempo fisiológico de *C. capitata* a través de las unidades calor acumuladas en territorios estratégicos denominados: zonas de contención potencial, zona de contención y zona de erradicación, derivado de imágenes satelitales climáticas ERA5. Se obtuvo un patrón espacio-temporal del periodo comprendido entre diciembre de 2020 a diciembre de 2021 del comportamiento térmico mensual que favorece a la Mosca del Mediterráneo en dos escalas: regional que abarco los países de El Salvador, Honduras, Guatemala y Sur de México, así como en las zonas estratégicas antes definidas. Se reveló que durante 2021 existió un comportamiento térmico mensual promedio que osciló entre 13.11y 37.38°C como temperaturas extremas. De manera específica, se identificaron aquellos lugares donde existió la acumulación térmica que determina el tiempo fisiológico de la plaga, basados en que *C. capitata* requiere de 251.7 unidades calor acumuladas para lograr alcanzar un ciclo de vida. Se determinó que en la zona de contención potencial existieron 463.42 unidades calor acumuladas en Honduras y El Salvador. En la zona de contención ubicada en Guatemala se determinaron 418.78 unidades calor acumuladas y finalmente en la zona de erradicación se logró una acumulación de 401.34 unidades calor, en Guatemala y costa del Pacífico en el sureste mexicano. Este tipo de enfoque puede coadyuvar en la toma de decisiones ante riesgo fitosanitarios o plagas exóticas, ya que, cuenta con la fortaleza que son insumos de libre acceso y de una temporalidad reciente, lo que puede permitir estimar escenarios de riesgo bajo un enfoque preventivo casi en tiempo real. Incluso, la modelación del confort térmico se puede modelar con un retraso de tres semanas a fecha actual, lo que potencializa implementar de manera efectiva estrategias preventivas por parte de los Organismos Nacionales y Regionales de Protección Fitosanitaria que son los encargados de implementar estrategias de mitigación ante el arribo de plagas de interés cuarentenario que ponen en riesgo el patrimonio agroalimentario mundial.

Palabras clave: Mosca del Mediterráneo, unidades calor acumuladas, riesgo fitosanitario, monitoreo, vigilancia epidemiológica

¹⁰ ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN PREPARADO como: Ibarra-Zapata, E., Aguirre-Salado, C.A., Miranda-Aragón, L., Loredó-Osti, C., Escoto-Rodríguez, M., Mora-Aguilera, G. y Silva-Gallegos, J.J. Modelado del tiempo fisiológico de *Ceratitís capitata* en territorios estratégicos de Latinoamérica, PARA SOMETERSE A ARBITRAJE.

Abstract

The Mediterranean fruit fly (*Ceratitidis capitata* Wiedemann) is a pest of quarantine interest that can directly affect the production and marketing of fruits and vegetables in the world, it is a species with a polyphagous behavior and has a high number of susceptible hosts, both wild and economically important. Currently, in Central America and southern Mexico there are strategic territories (potential containment zones, containment zone and eradication zone) in which the pest is permanently monitored and which are considered a barrier to the advance of the pest towards North America. The use of remote sensing in the area of plant health derived from satellite images has the potential to contribute to decision making in the establishment of preventive strategies to mitigate the advance of the pest. This approach can be considered a geotechnological tool that can assist in the monitoring and surveillance of phytosanitary risks through the analysis of environmental information, specifically the thermal factor, since temperature is an essential factor for the immature and adult stages of the Mediterranean fruit fly. The objective of this study was to calculate the physiological time of *C. capitata* using satellite images by estimating the accumulated heat units in strategic territories defined according to the historical behavior of the pest. A spatio-temporal pattern was obtained for the period from December 2020 to December 2021 of the monthly thermal behavior of the Mediterranean fruit fly at two scales: regional, covering the countries of El Salvador, Honduras, Guatemala and southern Mexico, as well as in the strategic zones defined above. It was found that during 2021 there was an average monthly thermal behavior that ranged between 13.11 and 37.38°C as extreme temperatures. Specifically, the regions where there was thermal accumulation that determine the physiological time of the pest were identified, based on the fact that *C. capitata* requires 251.7 accumulated heat units to reach one generation. It was determined that in the potential containment zone there were 463.42 accumulated heat units in Honduras and El Salvador. In the containment zone located in Guatemala, 418.78 accumulated heat units were determined and finally, in the eradication zone, an accumulation of 401.34 heat units was achieved in Guatemala and the Pacific coast in southeastern Mexico. This type of approach may help in decision making in the face of phytosanitary risks or exotic pests, since it has the strength that they are freely available inputs and of a recent temporality, which can allow estimating risk scenarios in almost real time under a preventive approach. Even the modeling of thermal comfort has a three-week delay to the current date, which makes it possible to effectively implement preventive strategies by National and Regional Plant Protection Organizations, which are responsible for implementing mitigation strategies in the face of the arrival of pests of quarantine interest that endanger the world's agri-food heritage.

Keywords: Mediterranean fruit fly, cumulative thermal units, phytosanitary risk, monitoring, epidemiological surveillance

7.1. Introducción

La mosca del Mediterráneo, *Ceratitidis capitata* (Wiedemann, 1824), es una de las plagas de los frutales y hortalizas más importante del mundo que puede ocasionar daño a especies cultivables y silvestres. Esta se considera la plaga más destructiva debido a que puede causar afectaciones directas en la reducción de rendimientos y pérdida de calidad de gran número de productos agroalimentarios (SENASICA, 2020).

De acuerdo con Enkerlin *et al.* (2015), el primer registro de *C. capitata* en América se remonta al periodo entre 1901 y 1905. En Centroamérica, se reportó por vez primera en 1955 en Costa Rica, de donde se extendió por toda la región hasta llegar a Guatemala en 1976, y posteriormente a Chiapas en la República Mexicana al siguiente año. Para 1979 había invadido

una sección de 300 km por la Costa del Pacífico desde la frontera entre Guatemala-México hasta el estado de Oaxaca.

El ciclo de vida de *C. capitata* es altamente influenciado por la temperatura (Ricalde *et al.*, 2012), además de otros factores abióticos como la precipitación y humedad relativa (Harris y Lee, 1986). Sin embargo, el factor térmico aporta un efecto determinante en la dinámica poblacional y en los niveles de infestación (Segura *et al.*, 2006), por ello, se decidió monitorear el tiempo fisiológico a través de las unidades calor acumuladas (UC_{Acum}) en tres porciones territoriales estratégicas.

Los territorios estratégicos son las zonas de contención potencial, contención y erradicación en Centro y porción sur de Norteamérica (Figura 7.1). De acuerdo con Enkerlin *et al.* (2017), se consideran como una barrera que ha sido efectiva para mantener un estatus fitosanitario libre de *C. capitata* en la región, logrando contener el avance de la plaga hacia el norte, así como disminuir las áreas de invasión de la plaga. Siendo territorios determinantes para el monitoreo y vigilancia epidemiológica de la plaga en una escala regional.

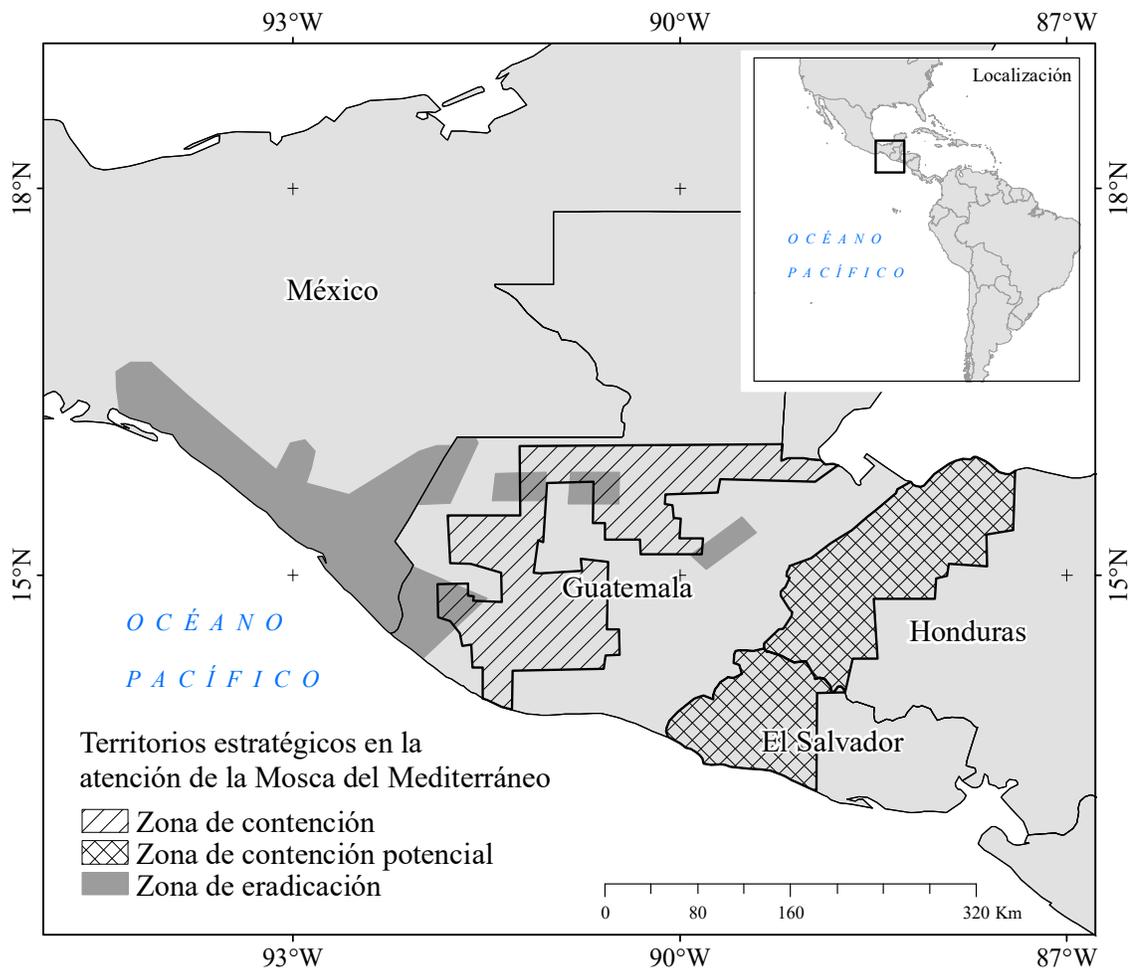


Figura 7.1. Zonas de atención estratégica de la Mosca del Mediterráneo en Centro y Norteamérica. Fuente: Elaboración propia, con base en la publicación de Enkerlin *et al.* (2017).

Las UC_{Acum} se pueden considerar un instrumento de monitoreo y evaluación del comportamiento de plagas agrícolas (Vargas, 1993). Por ejemplo, Grajeda-Grajeda *et al.* (2014) modelaron las condiciones favorables para el Gusano Barrenador de la Nuez, la roya de la hoja y la roya lineal en el Noroeste de México basados en el factor térmico. Tepole-García *et al.* (2016) calcularon el número de generaciones que se presenta *Leptoglossus zonatus* en un ciclo agrícola para estimar el daño potencial en las áreas productoras de sorgo en el estado de Morelos, México, utilizando datos de temperatura a partir de estaciones climatológicas.

Pacheco-Covarrubias *et al.* (2016) realizaron el cálculo del número de generaciones de mosca blanca (*Bemisia tabaci*) a través de las UC_{Acum} , encontrando que para esta especie no existe influencia entre la temperatura y su crecimiento poblacional. Recientemente, Olvera-Vargas *et al.* (2020) utilizaron imágenes satelitales MODIS para calcular los grados días de desarrollo de *Hypothenemus hampei* logrando espacializar el riesgo fitosanitario del problema entomológico más importante del cultivo del café.

El objetivo de este capítulo fue realizar el cálculo del tiempo fisiológico de *C. capitata* a través de las unidades calor acumuladas a partir de la utilización de imágenes satelitales climáticas ERA5 en territorios estratégicos en las denominadas zonas de erradicación, contención y contención potencial ubicadas en América Central y la porción sur de Norteamérica, que fungen como barrera de contención en el avance de la plaga.

7.2. Materiales y métodos

El factor térmico está estrechamente ligado al ciclo biológico de varios organismos, de manera tal que la temperatura promedio mensual, máxima y mínima, pueden inferir en la estimación de la cantidad de calor para el desarrollo del ciclo de vida, a través de la medición de la acumulación de calor a lo largo de un tiempo. Las UC_{Acum} son una expresión matemática de la acumulación de temperatura crítica de un organismo, y es equivalente al desarrollo de la especie (Ramírez-Cabral *et al.*, 2020).

De acuerdo con Duyck y Quilici (2002), *C. capitata* necesita una temperatura base (T_b) de 10.45°C , que se entiende como la temperatura mínima por debajo de la cual su desarrollo no ocurre, en complemento sus requerimientos calóricos específicos para completar un ciclo de vida, se puede alcanzar mediante un acumulado de 251.7 grados para lograr una generación, equivalente a un ciclo de vida. Según METEORED, (2020), en el año esta acumulación térmica se denomina el tiempo fisiológico de la especie y puede estimarse mediante el cálculo de las UC_{Acum} que se ajusta a las funciones seno de la temperatura máxima y mínima (Ramírez-Cabral *et al.*, 2020), conforme a la ecuación:

$$UC_{Acum} = \Sigma((T_{\text{máx}} + T_{\text{mín}})/2) - T_b$$

Donde, UC_{Acum} : Unidades calor acumuladas ($^{\circ}\text{C}$), $T_{\text{máx}}$: Temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$), $T_{\text{mín}}$: Temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$), T_b : Temperatura base ($^{\circ}\text{C}$).

La estimación de las UC_{Acum} a nivel mensual involucró el uso de imágenes satelitales climáticas ERA5. ASGROW (2018) menciona que el uso de tecnología geoespacial puede fortalecer los sistemas de monitoreo de plagas y enfermedades agrícolas. En este sentido, la aplicación de sensores remotos permite fortalecer la toma de decisiones en materia de la salud de las plantas, ya que permiten la adquisición de información de variables climáticas atmosféricas, terrestres u oceánicas, que en determinado momento benefician o pueden mermar la reproducción de un organismo tan voraz como *C. capitata*.

Para estimar las UC_{Acum} , se utilizaron las imágenes ERA5 que contienen los datos del re-análisis del clima global basado en sistemas de modelado y asimilación de datos del Centro Europeo de Pronósticos Meteorológicos a Medio Plazo (ECMWF por sus siglas en inglés), con una resolución espacial de 24 km (0.25 grados x 0.25 grados) (CCCS-C3S, 2017). Las coberturas de temperatura mensual, temperaturas máximas y temperaturas mínimas fueron obtenidas del sitio <https://app.climateengine.com/climateEngine>. Se realizó un análisis a una escala temporal mensual, que involucró un total de 26 imágenes satelitales en formato .tif y se consideró el periodo más reciente de las cuatro estaciones (de invierno a invierno) de diciembre de 2020 a diciembre 2021.

En complemento para el cálculo de las UC_{Acum} se creó una nueva cobertura espacial en formato *.tif para representar a la T_b considerando la región de estudio definiendo una resolución espacial conforme la imagen ERA5. Esto involucró un proceso de transformación y reclasificación de formato (raster-vector-raster), asignando el valor de pixel de 10.45°C , al considerarse la temperatura a la cual *C. capitata* detiene su desarrollo, a partir de la cual según se acumule puede acelerar o disminuir su desarrollo en función del comportamiento térmico según lo señalado por Duyck & Quilici (2002).

El procedimiento para obtener la estimación del tiempo fisiológico de *C. capitata* se realizó a través de la herramienta “*Raster calculator*” mediante álgebra de mapas para cada mes (13 en total). El cálculo se realizó bajo el comando: $((UC = T_{\text{máx_fecha1.tif}} + T_{\text{mín_fecha1}}) / 2 - T_b.tif)$. En complemento el cálculo de la UC_{Acum} se realizó a través de un proceso de enmascaramiento con tres zonas estratégicas para el monitoreo de *C. capitata* identificadas por Enkerlin *et al.* (2017): zona de contención potencial, contención y erradicación, las cuales se ubican en Centro y la porción sur de Norteamérica.

En complemento, se realizó un proceso de estandarización para la representación espacial del comportamiento térmico que favorece a *C. capitata* considerando los valores extremos ocurridos dentro de las tres zonas analizadas obteniendo una temperatura mínima de 12.3°C ocurrida en la zona de contención durante diciembre de 2021 y una temperatura máxima de 37.38°C registrada en la zona de erradicación durante abril del mismo año. El comportamiento térmico se representó cartográficamente en trece rangos para el periodo de estudio, espacialmente representado en tonalidades frías a cálidas (azul a rojo).

Espacialmente, la estimación del tiempo fisiológico a partir de imágenes satelitales se realizó a través del operador booleano de intersección AND mediante la herramienta “*Raster Calculator*”, bajo la expresión $(UC_{Acum} = 1.tif + 2.tif + 3.tif + 4.tif + 5.tif + 6.tif + 7.tif + 8.tif + 9.tif + 10.tif + 11.tif + 12.tif + 13.tif)$, cada cobertura equivalente a un mes en el periodo de estudio. Lo que permitió obtener las UC_{Acum} que favorecen el ciclo de vida de *C. capitata*, es decir, se pudo identificar la acumulación de calor que posibilita cuantificar el ¿cuándo? y el ¿dónde? se pueden lograr “n” número de generaciones en escala: regional y en las zonas estratégicas: contención potencial, contención y erradicación.

7.3. Resultados

De manera regional existió un comportamiento térmico mensual promedio — superior a la T_b (10.45°C) que osciló entre los 13.11°C y los 37.38°C entre el periodo de diciembre a diciembre de 2020/2021. Esto sugiere que el área de estudio es ambientalmente (por acumulación térmica) propensa a favorecer el ciclo de vida de la Mosca del Mediterráneo.

Cabe señalar, que en el periodo de estudio existió un aumento térmico de febrero a octubre, destacando que territorialmente, en abril y mayo se registró una superficie con mayor extensión

exhibiendo las temperaturas más elevadas (32.9 y 38.8°C), representadas en tonalidades de naranja a rojo. Las porciones con mayor extensión territorial y con más elevada temperatura se ubicaron en la Península de Yucatán e Istmo de Tehuantepec en México, así como el norte de Guatemala, seguida de una porción en la costa del Pacífico en Centroamérica, específicamente en El Salvador y Nicaragua y finalmente, se identificaron pequeñas porciones al norte/noreste de Nicaragua (Figura 7.2).

Por el contrario, espacialmente existió un patrón de distribución espacial donde se presentaron las temperaturas promedio mensuales más bajas (en tonalidad azul). Cabe señalar, que este comportamiento se presentó en todos los meses analizados solo disminuyendo o aumentando su extensión territorial a lo largo de las estaciones invierno, primavera, verano, otoño e invierno, donde existió un rango térmico que osciló entre los 13.2 a los 18.9°C. La mayor extensión territorial con las condiciones térmicas más bajas se identificó entre la porción central de Guatemala y Chiapas en México extendiéndose hacia el noroeste, así como una porción más estrecha al sur de Honduras y colindante a la señalada anteriormente (Figura 7.2).

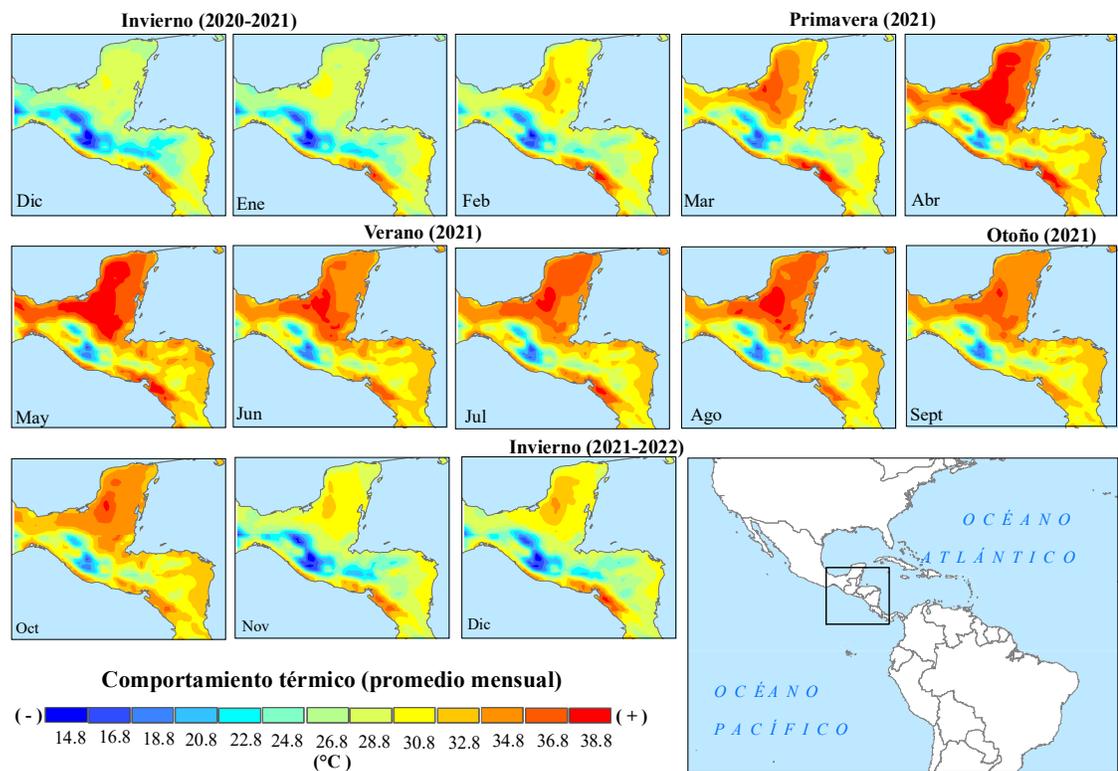


Figura 7.2. Evolución espacio-temporal del factor térmico a escala regional. Fuente: Elaboración propia, a partir de imágenes satelitales ERA5 del Centro Europeo de Pronósticos Meteorológicos a Medio Plazo (ECMWF).

El tiempo fisiológico de *C. capitata* se representó cartográficamente en cinco rangos por medio de los cuales se ilustró territorialmente dónde existieron las condiciones para lograr alcanzar una generación o ciclo de vida de la plaga (tonalidades azules), así mismo, se pudo percibir dónde existieron las condiciones para lograr casi dos generaciones representado en tonalidades de naranja

a rojo. Estos resultados se obtuvieron al considerar que la Mosca del Mediterráneo necesita 251.7 unidades calor acumuladas para el desarrollo de un ciclo de vida (Duyck y Quilici, 2002).

Espacialmente, el tiempo fisiológico presentó un comportamiento uniforme en los territorios estratégicos. En la zona de erradicación, existieron condiciones térmicas para lograr una generación; sin embargo, en toda la Costa del Pacífico existieron condiciones térmicas para lograr casi dos generaciones faltando 84.62 UC_{Acum}. Esta condición se dio en la porción ubicada entre el límite entre México y Guatemala. Cabe señalar que, durante el periodo de estudio la temperatura mensual promedio mínima y máxima fue de 13.11°C en noviembre y 37.38° C en abril, respectivamente. Temporalmente, la zona de erradicación logró una acumulación de 418.78 UC_{Acum}; sin embargo, para los meses junio/julio ya existían las condiciones para lograr una generación o ciclo de vida de *C. capitata*, mostrando una acumulación de entre 225.56 y 258.59 UC_{Acum} a este mes (Figura 7.3a).

En la zona de contención — porción central de Guatemala, se dieron las condiciones características de un patrón térmico para alcanzar una generación. Además, al norte existió una acumulación de temperatura para casi lograr una segunda generación durante el año de estudio. Cabe señalar que, la temperatura mínima mensual se registró en noviembre con 19.3°C y la máxima mensual fue de 36.26°C durante mayo. En esta zona se reveló la menor acumulación térmica con 401.345 UC_{Acum}, y temporalmente fue la que presentó más retraso en la acumulación, ya que fue para julio/agosto que existieron las condiciones para lograr una generación con un rango de 249.56 a 281.88 UC_{Acum} (Figura 7.3b).

En la zona de contención potencial, se presentó una mayor acumulación térmica en el Salvador y norte de Honduras con porciones territoriales donde se acumuló entre 308 y 424 UC_{Acum}, representado en tonalidades naranja y rojo respectivamente. La temperatura mínima y máxima mensual promedio se presentó durante diciembre de 2020 con 12.3°C y 37.09°C en mayo. En esta zona se logró alcanzar la mayor acumulación térmica (463.42 UC_{Acum}). Cabe señalar que para junio/julio ya existía entre 249.845 y 287.23 UC_{Acum}, siendo las condiciones para que *C. capitata* pudiera lograr un ciclo de vida o una generación (Figura 7.3c).

La estimación de las unidades calor acumuladas de *C. capitata* reveló que para los meses de junio/julio del año 2021 existieron las condiciones térmicas para lograr una generación en las zonas de erradicación y de contención potencial con 258.59 UC_{Acum} y 287.23 UC_{Acum} respectivamente, sin embargo, para la zona de contención presentó condiciones de confort térmico para julio/agosto logrando 281.88 UC_{Acum}, es decir, en los territorios estratégicos para atención de la Mosca del Mediterráneo, se presentaron las condiciones de confort térmico con un mes de desfase territorialmente de norte a sur lo que implicó que en la costa del Pacífico en Chiapas, México y Guatemala fuera la primer región con condiciones para lograr una generación, seguida de la porción central de Guatemala y finalmente el norte de Honduras y el Salvador. Considerando que según Duyck y Quilici (2002), *C. capitata* necesita 251.7 UC_{Acum} para alcanzar una generación, sin embargo, es pertinente señalar que en las tres zonas casi se logra alcanzar una segunda generación según las UC_{Acum}.

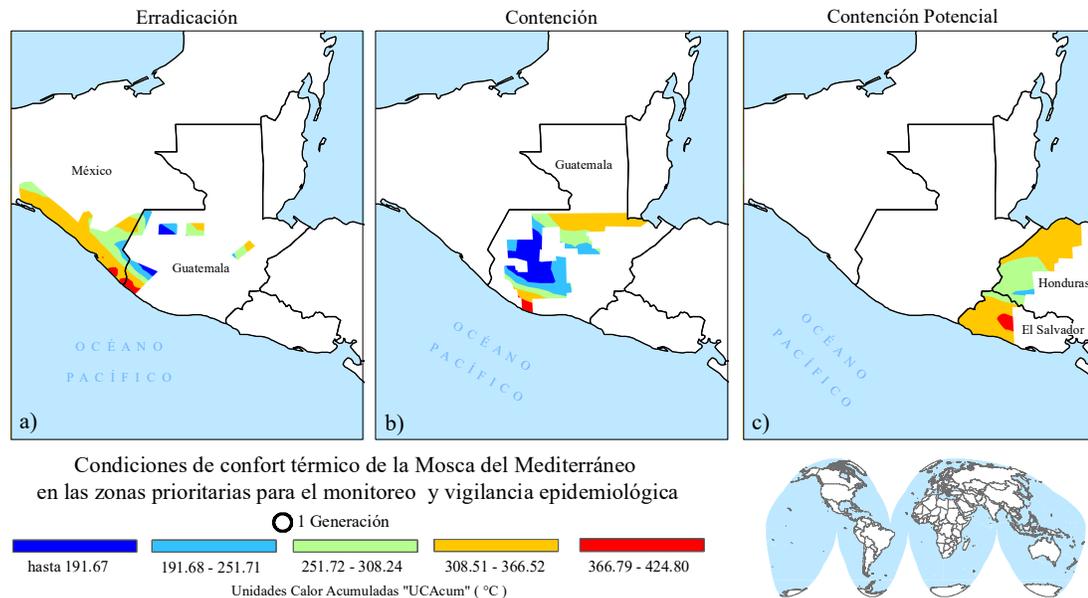


Figura 7.3. Comportamiento espacio-temporal de las Unidades Calor Acumuladas en los territorios estratégicos para la Mosca del Mediterráneo: a) Zona de erradicación, b) Zona de contención y c) Zona de contención potencial.

7.4. Discusión

En este capítulo se identificaron superficies con características óptimas para plagas como *C. capitata* que representa un riesgo latente para la producción de agroalimentos, incluso para especies silvestres. La utilización de productos derivados del satélite ERA5 proporcionó variables que pueden aportar información estratégica para modelar escenarios de riesgo basado en variables ambientales; ya que elementos como temperatura, precipitación, humedad relativa, entre otros, son esenciales para la supervivencia de organismos como insectos, virus, hongos o bacterias, y que muchas veces fungen como agentes plagas o vectores de enfermedades con afectaciones a la salud de las plantas. De manera específica, el cálculo del tiempo fisiológico basado en las unidades calor acumuladas a partir de imágenes ERA5 se puede considerar un insumo que puede coadyuvar en la toma de decisiones en los procesos de monitoreo y vigilancia epidemiológica de la Mosca del Mediterráneo, logrando definir superficies o territorios con condiciones térmicas óptimas donde es factible la reproducción de la plaga.

Es recomendable que los Organismos Nacionales y Regionales de Protección Fitosanitaria adopten enfoques transdisciplinarios donde se involucren el uso de productos satelitales como apoyo de los procesos de vigilancia epidemiológica fitosanitaria de plagas y enfermedades de interés cuarentenario y económico, incluso de plagas exóticas, puesto que posibilitan ubicar espacialmente donde se localizan las condiciones de confort que favorecen a la especie de riesgo. La metodología aplicada se enfocó en dar seguimiento espacial y temporal a las áreas prioritarias para el monitoreo de *C. capitata* a lo largo de un año con datos mensuales; sin embargo, se considera que de acuerdo a la información disponible es factible realizar un seguimiento, casi en tiempo real con tres semanas de desfase.

Este tipo de análisis donde se integró el uso de tecnología satelital, conocimientos agronómicos y epidemiología de la plaga tomados a partir de referencias científicas y análisis espacial, pone en manifiesto la integración de diferentes disciplinas, lo que sin duda alguna, permite la obtención de resultados de investigación que puedan aportar en la definición o direccionamiento de estrategias preventivas favoreciendo de manera directa la vigilancia epidemiológica de plaga en zonas prioritarias. Por otro lado, el hecho de que los productos empleados en la modelación, sean insumos de libre acceso, permite que se puedan estar actualizando periódicamente (con tres semanas de retraso a fecha actual), y con ello posibilitando alimentar las plataformas de monitoreo o vigilancia de problemas fitosanitarios prioritarios para los Organismos Nacionales e Internacionales de Protección Fitosanitaria en la región. Incluso, la metodología expuesta tiene el potencial de adaptarse a otras plagas de interés cuarentenario o económico en cualquier región del planeta.

7.5. Conclusión

La utilización de insumos satelitales, de libre acceso y temporalmente recientes, permitió obtener resultados útiles en procesos de monitoreo y vigilancia epidemiológica de organismos plaga, los cuales que pueden causar afectaciones al patrimonio agrícola, impactando de manera directa en la soberanía y seguridad agroalimentaria, ya que un organismo como la Mosca del Mediterráneo puede ocasionar grandes estragos en la economía local, regional o nacional de los territorios donde existan las condiciones que favorecen la introducción, establecimiento y dispersión de una plaga polífaga como *C. capitata*. A pesar que las imágenes ERA5 cuentan con una resolución espacial baja (24 km) presentan como ventaja que también poseen una resolución temporal alta, es decir, se cuenta con una baja resolución espacial pero alta resolución temporal y por ser de libre acceso resultan una herramienta geoespacial con el potencial de ser un insumo que aporte al monitoreo o vigilancia epidemiológica fitosanitaria de plagas y enfermedades reglamentadas o cuarentenarias. Estos insumos satelitales pueden aportar en la toma de decisiones fitosanitarias al permitir realizar cálculos de tiempo fisiológico actual (con tres semanas de desfase) y territorialmente de cualquier región del mundo. La estimación del tiempo fisiológico (UC_{Acum}) utilizando imágenes satelitales ERA5 posee la capacidad de crear escenarios térmicos actuales recientes y con ello fortalecer la toma de decisiones ante riesgos fitosanitarios como el que representa *C. capitata*. Además, este tipo de modelaciones puede complementarse con el uso de técnicas de evaluación espacial multi-criterio, donde se pudieran integrar otras variables ambientales como la precipitación y humedad relativa.

7.6. Literatura citada

- ASGROW. (2018). Manejo de zonas de plagas con imágenes satelitales. Consultado: 3 de febrero de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3NEcHMU>.
- CCCS-C3S. (2017). Copernicus Climate Change Service (C3S) ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store. Consultado: 13 de noviembre de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3R7CPmk>
- Duyck, P.F y Quilici, S. (2002). Supervivencia y desarrollo de diferentes etapas de la vida de tres *Ceratitis spp.* (Diptera: Tephritidae) Criado a cinco temperaturas constantes. *Bulletin of Entomological Research*. 92:461–469.
- Enkerlin, W., Gutiérrez-Ruelas, J.M., Villaseñor-Cortés, A., Cotoc-Roldán, E., Midgarden, D., Lira, E., Zavala López, J.L., Hendrichs, J., Liedo P. and Trujillo Arriaga, F.J. (2015). Area Freedom in Mexico from Mediterranean Fruit Fly (Diptera: Tephritidae): A Review of Over 30 Years of a Successful Containment Program Using an Integrated Area-Wide SIT Approach. *Florida Entomologist*, 98(2):665-681.
- Enkerlin, W.J., Gutiérrez Ruelas, J.M., Pantaleón, R., Soto Litera, C., Villaseñor Cortés, A., Zavala Lopez, J.L., Orozco Dávila, D., Montoya Gerardo, P., Silva Villarreal, L., Cotoc Roldán, E., Hernández López, F., Arenas Castillo, A., Castellanos Domínguez, D., Valle Mora, A., Rendón Arana, P., Cáceres Barrios, C., Jardín Medio, D., Villatoro Villatoro, C., Lira Prera, E., Zelaya Estradé, O., Castañeda Aldana, R., López Culajay, J., Ramírez y Ramírez, F., Liedo Fernández, P., Ortiz Moreno, G., Reyes Flores, J., and Hendrichs, J. (2017). The Moscamed Regional Programme: review of a success story of area-wide sterile insect technique application. Special Issue - Sterile Insect Technique. *Special Issue - Sterile Insect Technique*. <https://doi.org/10.1111/eea.12611>
- Harris, E.J. and Lee, C.Y.L. (1986). Seasonal and annual occurrence of Mediterranean fruit flies (Diptera: Tephritidae) in Makaha and Waianae Valleys, Oahu, Hawaii. *Environmental Entomology*, 15:507–512.
- METEORED. (2020). La importancia de la fenología. Consultado: 1 de noviembre de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3yebVjT>
- Olvera-Vargas, L. A., Contreras-Medina, D.I. y Aguilar Rivera, N. (2020). Cálculo de grados días de *Hypothenemus hampei* a través de imágenes satelitales. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 11(3):544-554.
- Pacheco-Covarrubias, J.J., Soto-Nolasco, J. y Valenzuela-Valenzuela, J.M. (2016). Densidad poblacional de Mosca blanca *Bemisia spp.* (Hemiptera: Aleyroididae) en el valle de Guaymas-Empalme Sonora, México. *Biotecnia*. 18(3):9–13.
- Ramírez-Cabral, N., Medina-García, G. & Kumar, L. (2020). Increase of the number of broods of Fall Armyworm (*Spodoptera frugiperda*) as an indicator of global warming. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*. 19(1):1–16.

- Ricalde, M.P. Nava, D.E., Loeck, A.E., Donatti, M.G. 2012. Temperature-dependent development and survival of Brazilian populations of the Mediterranean fruit fly, *Ceratitis capitata*, from tropical, subtropical and temperate regions. *Journal of Insect Science*. 12(33):1-11.
- Segura, D.F., Vera, M.T. y Cladera, J.L. (2006). Fluctuación estacional en la infestación de diversos hospedadores por la mosca del Mediterráneo, *Ceratitis capitata* (Díptera: Tephritidae), en la provincia de Buenos Aires. *Ecología Austral*, 14:3–17.
- SENASICA. (2020). Ficha técnica Mosca del Mediterráneo. Consultada: 3 de abril de 2022. Disponible en: <https://www.gob.mx/senasica/documentos/mosca-del-mediterraneo-110879>
- Tepole-García, R.E., Ramírez-Rojas, S., Bartolo-Reyes, J.C. y Castrejón-Gómez, V.R. (2016). Ciclo de vida y análisis de riesgo climático de *Leptoglossus zonatus* Dallas (Hemíptera: Coreidae) para las zonas productoras de sorgo en el estado de Morelos, México. *Acta Zoológica Mexicana*, 32(3), 300–309.

CAPÍTULO 8. DISCUSIÓN Y CONSIDERACIONES FINALES

Este trabajo de investigación se enfocó en modelar geoespacialmente cuatro plagas agrícolas de potencial devastador y que aún no se encuentran oficialmente en México: 1) *Fusarium oxysporum*, f. sp. *cubense* raza 4 tropical, 2) *Vespa mandarinia* (Smith 1852) (Hymenoptera: Vespidae), 3) *Xanthomonas citri* pv. *citri* y 4) *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae). Para desarrollar y presentar esta investigación, el trabajo se dividió en siete grandes capítulos logrando los siguientes resultados y determinando las siguientes consideraciones finales.

En el Capítulo 1 se presentan a los actores de la sanidad vegetal a nivel global, denominados, Organismos Regionales de Protección Fitosanitaria (ORPF), así como los esfuerzos invertidos en la implementación de la tecnología geoespacial como apoyo a la protección fitosanitaria. De manera global, la salud de las plantas está estrechamente ligada a la salud humana, puesto que de ellas obtenemos el oxígeno indispensable para vida, así mismo, las plantas son esenciales para alimentación, sin embargo, de acuerdo con la Skendzic *et al.* (2021), cada año existe afectaciones de hasta un 40% en la producción global de alimentos, asociado a plagas agrícolas. En este sentido los ORPF apoyados en normativa internacional han implementado herramientas para determinar áreas o sitios de riesgo o peligro ante una posible introducción, establecimiento o dispersión de plagas de interés cuarentenario o económico, e inclusive plagas exóticas (NIMF No. 6, 2018).

Los ORPF son los encargados de coordinar la protección fitosanitaria (regional y en sus países miembros) basados en la aplicación de medidas sanitarias y fitosanitarias de la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria. De acuerdo con Garrett *et al.* (2013), desde inicios del siglo XXI se han utilizado nuevos enfoques en la modelación de pérdida de la producción agrícola, entre los que destacan el realizado por el Centro Internacional de la Papa, con la aplicación de modelado geoespacial de enfermedades (Hijmans y Walker, 2000), estimando el riesgo potencial del tizón tardío de la papa logrando obtener predicciones globales y la evaluación de futuros daños. Al respecto Magarey *et al.* (2007) y Margosian *et al.* (2009), señalan que los mapas de riesgo de plagas (derivados del modelado geoespacial) pueden contribuir a la toma de decisiones respecto a patógenos invasores ante una posible introducción, establecimiento o dispersión en cualquier región del planeta.

De manera general, los ORPF abarcan casi todas las regiones geográficas y han tenido un acercamiento a la disciplina geográfica mediante el uso de los sistemas de información y el modelado geoespacial. Este tipo de enfoques favorece la toma de decisiones en tiempo oportuno siendo vital en actividades operacionales y estratégicas en sanidad vegetal (Chambilla-Chávez, 2019); incluso, Muñoz-Burbano (2019) señala que el componente espacio-temporal fortalece en la definición de medidas para la vigilancia epidemiológica fitosanitaria. De manera conjunta la sanidad vegetal y el análisis espacial permiten la integración de múltiples factores que inciden en la productividad de cultivos, lo que permite generar y formular nuevas estrategias de mitigación del riesgo de plagas. Sin duda alguna, este tipo de enfoques beneficia y se encuentra en la mira o aplicación actual por parte de los Organismos Regionales y Nacionales de Protección Fitosanitaria, ya que permite direccionar estrategias de prevención y mitigación del riesgo de plagas ante la posible introducción, establecimiento o dispersión de plagas de importancia económica o cuarentenaria, así como de especies exóticas.

En el Capítulo 2 se planteó un panorama global de las amenazas que ponen en riesgo la citricultura mexicana (cancro, mancha negra y clorosis variegada de los cítricos). Se realizó un estudio de riesgo de plagas considerando los factores de condición fitosanitaria o presencia oficial (por país, estado o provincia) respecto a los flujos comerciales, considerando origen destino de productos o

subproductos cítricos de la fracción arancelaria 0.0805 y 0.0814, ya que, de acuerdo con la FAO conforme la NIMF No. 11 (2001), el riesgo de introducción de plagas de plantas es factible mediante las importaciones de plantas y productos vegetales. En este sentido, Castillo (2018) señala que recientemente existe un aumento en el riesgo de introducción y establecimiento de plagas estrechamente ligado al intercambio comercial de productos agropecuarios y no agropecuarios, involucrando básicamente el medio de transporte como la posible vía de diseminación.

Actualmente, la comercialización cítrica a escala global incorpora componentes tecnológicos y de innovación ante un eminente cambio climático, lo que desemboca en una competencia global de los mercados hortofrutícolas basados en la calidad, oferta y demanda de variedades cítricas (Compés-López *et al.*, 2019). Lo anterior, conlleva a una movilización global de cítricos y con ello un riesgo global en la introducción, establecimiento y dispersión de amenazas cuarentenarias *i.e.*, el cancro de los cítricos se introdujo en Florida por semillas de naranjo trifoliado importadas de Japón durante 1910 (Dewdney *et al.*, 2019), la clorosis variegada de los cítricos fue descrita en Brasil durante 1987 y, cinco años después se diseminó por la región cítrica infectando a más de dos millones de árboles (Berbé *et al.*, 2021) y la mancha negra o black spot, se considera la principal enfermedad fúngica de los cítricos a escala mundial (Berbé *et al.*, 2020).

Estimar escenarios de riesgo desde una perspectiva espacial bajo los principios de localización y proximidad, permite poner en un mismo plano tres amenazas cítricas, respondiendo preguntas como el ¿dónde se encuentran?, ¿cuál es su condición fitosanitaria? y ¿con quién se mantienen relaciones comerciales de productos o subproductos hospedantes de los patógenos analizados? La finalidad del capítulo 2 es poner en manifiesto lo que implican las amenazas de cancro, clorosis y mancha negra de los cítricos, identificando la situación actual bajo un enfoque preventivo, ya que como señalan Urbaneja *et al.* (2020), la prevención es la mejor arma para mantener la buena sanidad que a la fecha actual poseen los cítricos mexicanos.

En el Capítulo 3 se presenta un panorama global sobre las principales amenazas cuarentenarias de las musáceas que actualmente mantienen un estatus oficial ausente en México, (Fusariosis de las musáceas “FocR4T”, Marchitez bacteriana del plátano “BTTV” y Cogollo racimoso del banano “BXW”). El objetivo de este capítulo fue estudiar la condición epidémico-espacial de las amenazas cuarentenarias del plátano, resaltando las implicaciones en la economía de la producción del cultivo en la República Mexicana. Lo anterior se obtuvo analizando la condición fitosanitaria en un contexto espacial, resaltando la situación fitosanitaria en el mundo (a nivel país, estado o provincia) y su relación espacial con las áreas cultivables en la República Mexicana, lo que conllevó a determinar los clústeres de producción de plátano a nivel municipal, haciendo énfasis en la superficie sembrada (ha) y en la producción (t).

México se posiciona como en el 15^{vo} lugar en cuanto a área sembrada de plátano/banano con aproximadamente 80 mil hectáreas distribuidas en 16 estados, así mismo se encuentra como el 12^{vo} lugar en producción del cultivo. A escala global, aludiendo al principio geográfico de proximidad, las amenazas cuarentenarias están presentes en territorios relativamente cercanos a límites administrativos de México: FocR4T está presente en Colombia a 1,800 km lineales del sureste mexicano y BXW a poco más de 4500 km lineales de la costa del Pacífico mexicano, en Hawái, E.U.A. Como complemento, a escala nacional, se identificaron seis clústeres que concentran la superficie sembrada del plátano mexicano: dos en Chiapas, uno entre Chiapas/Tabasco, uno en el centro-norte de Veracruz, uno en los límites de Colima/Michoacán y finalmente uno en Nayarit. Sin embargo, se identificaron tres clústeres que soportan la producción de plátano, los cuales se ubican: uno en la costa del Pacífico en el estado de Colima, uno en Chiapas al límite con Guatemala y uno en la porción norte de Chiapas al límite con el estado de Tabasco.

La Organización Nacional de Protección Fitosanitaria Mexicana mantiene una vigilancia epidemiológica activa de las amenazas de las musáceas, a través de estrategias operativas, además se restringió de manera legal la importación de frutos frescos, plantas de plátano lo que incluye embalajes de países afectados con la presencia de plagas de importancia cuarentenaria del plátano. Por ello, la importancia de estimar escenarios de riesgo fitosanitario desde una perspectiva epidémica/espacial, ya que se consideran como una seria amenaza para la agroindustria del plátano y la seguridad alimentaria *i.e.*, FocR4T se considera la enfermedad fúngica más destructiva de las musáceas y está posicionada entre las diez enfermedades más importantes de la agricultura (OIRSA, 2022), BXW es la enfermedad viral más devastadora del plátano en el mundo (SENASICA, 2019a) y BTTV es una enfermedad de alto riesgo en los países donde está presente, ya que ha causado reducciones significativas con grandes pérdidas económicas (SENASICA, 2019b)

En el Capítulo 4 se presentó la primera modelación geoespacial fitosanitaria del riesgo asociado a *Fusarium oxysporum*, f. sp. *cubense* raza 4 tropical a escala global, con mayor énfasis en América pantropical. Se realizó la modelación a diferentes escalas geográficas, logrando identificar los territorios bajo diferentes niveles de riesgo fitosanitario: muy alto, alto, medio, bajo y muy bajo. El nivel de riesgo se estableció considerando los componentes epidémicos: distribución potencial (patógeno/ hospedante) y el potencial de daño económico por asociación espacial de nodos comerciales (origen/destino), lo cual se integró mediante una evaluación multicriterio (MCDA), con una asignación de pesos equivalente (igual) para cada criterio de análisis.

Hoy en día el agente causal de la Fusariosis de las musáceas se considera la amenaza más grave para las musáceas en América pantropical, porque ha sido detectada en La Guajira Colombia en 2019 (ICA, 2019) Posteriormente, se confirmó su presencia en el norte del Perú (IICA, 2021). Esta enfermedad se considera un riesgo fitosanitario latente porque el agente causal puede sobrevivir en suelo por más de 20 años (Martínez-Solorzano *et al.*, 2020). Al respecto los Organismos Regionales y Nacionales de Protección Fitosanitaria de América fortalecen sus protocolos de acción ante el posible arribo de la enfermedad a zonas productoras de plátano *i.e.*, el Organismo Internacional Regional de Sanidad Agropecuaria (OIRSA) proporcionó las bases (técnico/científicas/reglamentarias) para implementar acciones propicias para identificar, erradicar, contener y manejar de manera adecuada un brote de FocR4T en la región (Dita *et al.*, 2013).

El modelado geoespacial aplicado a la principal amenaza de las musáceas busca fortalecer estrategias de prevención y coadyuvar en los planes de contingencia en una escala regional, ya que los resultados se presentan en cartografía o mapas de riesgo de plagas que permiten describir dónde podrían llegar, establecerse, propagarse o tener efectos catastróficos. Los resultados obtenidos permiten identificar espacialmente el riesgo fitosanitario ubicando áreas para implementar estrategias preventivas según el nivel de riesgo, *i.e.*, la superficie prioritaria en América Pantropical representa un total de 26,598 km² que según en componente epidémico se pueden considerar en riesgo fitosanitario muy alto (>0.9) distintas superficies ubicadas en Ecuador, Brasil, México, Guyana, Guatemala, Venezuela, Panamá y Colombia.

En el Capítulo 5 se planteó la determinación del análisis de riesgo aplicado a una plaga exótica como *Vespa mandarinia* (Smith 1852) (Hymenoptera:Vespidae), comúnmente denominado avispon gigante asiático, que de acuerdo con Ramsey (2021), es una especie que se considera una amenaza potencial para la apicultura en Norte América, lo que de manera indirecta puede ocasionar afectaciones en el proceso de polinización. Alaniz *et al.* (2020) indica que este avispon podría desencadenar una preocupación mundial en la agricultura afectando la producción de alimentos y la biodiversidad. Esto en razón de que *V. mandarinia* podría colonizar una porción significativa de la costa este de Estados Unidos. Al respecto, esta zona identificada por Alaniz *et*

al. (2020) se ubica a poco más de 2000 km de límites administrativos de México, y como dato importante se tiene que tales lugares se encuentran conectados con México a través del sistema montañoso de la Cordillera de América del Norte; *V. mandarinia* prefiere hábitats para anidar en tierras bajas y bosques, al pie de las sierras (Matsuura y Sakagami, 1973).

El diagnóstico espacial del riesgo sanitario asociado a *V. mandarinia* incorporó los cultivos de importancia económica agrupados según el porcentaje de polinización (en escala municipal) y la distribución potencial del avispon gigante asiático (considerando las detecciones en Norte América), lo que permitió obtener un modelo cartográfico de riesgo sanitario que identificó las porciones territoriales donde pueden verse afectados los procesos de polinización en cuatro escenarios: 1) territorios donde predominan cultivos dependientes a la polinización de 91 a 100%, 2) porciones territoriales donde predominan cultivos que necesitan de 41 a 90%, 3) territorios que engloban cultivos con una dependencia de 11 a 40% y 4) las superficies donde predominen cultivos con dependencia de <10% de polinización, los cuales fueron asociados espacialmente a las condiciones ambientales que favorecen el posible establecimiento de *V. mandarinia*.

Se lograron identificar los clústeres o agrupamientos de áreas en riesgo sanitario, siendo 184 prioritarios, con riesgo muy alto, donde existen condiciones ambientales y los cultivos que requieren una dependencia a la polinización casi total (91 a 100%), así como 349 clústeres en riesgo alto, 257 en riesgo medio y 443 en riesgo bajo. Estos resultados fueron determinados mediante el Índice de Moran, proyectándolos como un insumo técnico/científico con el potencial de favorecer la toma de decisiones ante el posible ingreso de plagas exóticas a territorio mexicano como el avispon gigante asiático. Estos resultados se pueden considerar como una herramienta de carácter preventivo para direccionar las estrategias de vigilancia oportuna ante el posible arribo de especies invasoras, ya que se pueden considerar como una medida sanitaria sustentada en hechos específicos, tomando en cuenta las diferentes condiciones geográficas y otros factores epidémicos, basado en la epidemiología espacial bajo la premisa de que todos los fenómenos desarrollados en el territorio se encuentran relacionados unos con otros (Valera-Bernal, 2012).

En el Capítulo 6 se presenta la estrategia desarrollada para modelar espacialmente el potencial del cancro de los cítricos en la planicie costera del Golfo de México mediante un análisis multicriterio (con asignación de pesos) considerando como criterio esencial la triada epidémica: patógeno/ambiente/hospedante. El agente causal del cancro de los cítricos provoca una enfermedad bacteriana que desencadena pérdidas económicas considerables a la industria citrícola global, ya que puede ocasionar el cierre de fronteras a la comercialización citrícola por la depreciación del fruto (mal aspecto). El enfoque epidémico/espacial permitió que se estimaran los patrones espaciales de riesgo fitosanitario asociado a *X. citri*, mediante el análisis de asociación/interacción que integró: el ambiente favorable para patógeno (distribución potencial), el potencial productivo de hospedantes de importancia económica (condiciones edafo-climáticas) y los mecanismos de dispersión (asociados a viento/lluvia/temperatura).

La PCG se consideró como el territorio primario de posible introducción del patógeno al ser una porción adyacente a los brotes ocurridos en el sur de Texas y Noreste de México (Da Graça *et al.*, 2017), Además que es una región que tiene como barrera natural la SMO considerando una altitud próxima a los 1,000 m.s.n.m. (SEMARNAT-CONANP, 2019). El enfoque empleado en esta tesis se sustentó en métodos y técnicas de la disciplina geográfica como la evaluación multicriterio y el uso de los sistemas de información geográfica, desde una perspectiva epidémica que integró a la biología, los hábitos y mecanismos de dispersión del patógeno, permitiendo caracterizar los criterios que favorecen la posible introducción, establecimiento y dispersión del cancro de los cítricos. En una primera etapa se realizó una asociación espacial de eventos meteorológicos extremos que posibilitaron la dispersión del inóculo a corta y larga distancia, seguida de la modelación de la distribución potencial mediante el modelo de nicho ecológico, lo cual se

complementó con un análisis de superposición de coberturas del potencial productivo de cítricos, para finalmente modelar mediante la evaluación espacial multicriterio los patrones espaciales del riesgo fitosanitario asociado al cancro de los cítricos que integró la definición de los criterios (C_n), la reclasificación y la asignación de pesos por nivel de importancia según el nivel de decisión.

Se obtuvo un modelo de ambiente favorable definido en un 57% por el comportamiento térmico de la región, que, según Canteros *et al.* (2017), es una variable esencial en el proceso de infección. Se obtuvo un modelo cartográfico de riesgo fitosanitario en el que se determinó que 31 mil km² cuentan con cierto nivel de riesgo fitosanitario, los cuales se distribuyen en seis niveles de riesgo: muy alto, alto, medio, bajo, muy bajo y mínimo, permitiendo caracterizar seis escenarios de riesgo. Estos resultados buscan fortalecer la toma de decisiones ante la posible introducción, establecimiento o dispersión de *X.citri* en territorio nacional, lo cual se complementó con la estimación de los cuadrantes fitosanitarios prioritarios, concebidos como áreas o porciones territoriales que cuentan con características favorecen al patógeno. El RF-muy alto presentó un agrupamiento delimitado por 25 cuadrantes, seguido de 6 cuadrantes en RF-alto, entre ellos el de mayor extensión territorial, además, en RF-medio y RF-bajo se identificaron 73 y 44 cuadrantes distribuidos a lo largo de la PCG a excepción de la porción baja de la PCG y finalmente con menores densidades se identificaron los cuadrantes en RF-muy bajo y en RF-mínimo con 99 y 2, respectivamente. Los cuadrantes fitosanitarios prioritarios se pueden considerar una herramienta que permite la colocación o re direccionamiento de estrategias operativas en la vigilancia epidemiológica fitosanitaria del cancro de los cítricos en la PCG.

El Capítulo 7 culmina el trabajo de investigación realizado en esta tesis con el análisis del riesgo de la Mosca del Mediterráneo mediante la determinación de los lugares donde se cumple la condición de alcanzar 251.7 ° C de Unidades Calor Acumuladas permitiendo que la especie logre un ciclo de vida. Esta condición también se le denomina como tiempo fisiológico de la especie. *C. capitata* es una plaga con el potencial de ocasionar afectaciones directas a la producción y comercialización de frutas y hortalizas en el mundo. De acuerdo con Ricalde *et al.* (2012), el factor térmico es un elemento esencial para los estados inmaduros y adultos de la Mosca del Mediterráneo. Por ello, la utilización de productos obtenidos de imágenes satelitales en el análisis de riesgo de plagas puede considerarse un insumo esencial en el monitoreo de porciones territoriales estratégicas en el posible avance de la plaga hacia América del norte.

El monitoreo mensual del factor térmico se realizó durante un año (de diciembre 2020 a diciembre 2021), determinando el tiempo fisiológico de *C. capitata* para tres porciones territoriales, de acuerdo a la regionalización propuesta por Enkerlin *et al.* (2017): 1) la zona de contención potencial en los países de El Salvador y Honduras al límite con Guatemala, 2) la zona de contención en la porción central de Guatemala extendiéndose desde la costa del Pacífico hasta Belice y 3) la zona de erradicación que incluye la porción central de Guatemala, la costa Pacífico en Guatemala y parte del estado de Chiapas en México. Lo anterior se realizó tomando en cuenta que la Mosca del Mediterráneo necesita una temperatura base (T_b) de 10.45°C; debajo de esta temperatura, su desarrollo no ocurre. Además, se utilizaron los requerimientos calóricos específicos para completar un ciclo de vida, que se puede alcanzar mediante un acumulado de 251.7 grados para lograr una generación (Duyck y Quilici, (2002).

Como resultado de esta modelación, se obtuvo un patrón espaciotemporal regional de comportamiento térmico, revelando una oscilación térmica entre 13.11°C a los 37.38°C, entre el periodo de diciembre a diciembre de 2020/2021, se percibió un aumento térmico de febrero a octubre, destacando territorialmente que en abril y mayo se registró una superficie de mayor extensión con las temperaturas más elevadas (32.9 y 38.8°C, respectivamente). Este enfoque permitió identificar que el tiempo fisiológico presentó un comportamiento uniforme en los territorios estratégicos, donde para los meses de junio/julio/agosto existían ya las condiciones

térmicas para que la plaga pudiera lograr una generación en las tres zonas, solo por un desfase mensual. Es decir, la estimación de las unidades calor acumuladas de *C. capitata* reveló que para los meses de junio/julio del año 2021 existían ya las condiciones térmicas para lograr una generación en las zonas de erradicación y de contención potencial con 258.59 UC_{Acum} y 287.23 UC_{Acum}, respectivamente. Esta metodología puede adaptarse para el estudio de otras plagas donde la temperatura sea un factor esencial en su reproducción.

Los modelos cartográficos generados en esta tesis para cada una de las amenazas fitosanitarias pueden ser actualizados en tiempo real como parte de un proceso de geointeligencia y es una herramienta que puede considerarse imprescindible en la línea de combate de estos organismos plaga, que eventualmente pueden poner en riesgo la seguridad alimentaria, la biodiversidad, e incluso la salud humana de un país, una región (que consiste en un grupo de países), o a nivel global.

8.1. Literatura citada

- Alaniz, A.J., Carvajal, M.A. and Vergara, P.M. (2020). Giants are coming? Predicting the potential spread and impacts of the giant Asian hornet (*Vespa mandarinia*, Hymenoptera:Vespidae) in the USA. *Pest Management Science*. 77(1):104–112.
- Canteros, B.I., Gochez, A.M., Moschini, R.C. (2017). Management of citrus canker in Argentina, a success story. *Plant Pathology Journal*. 33(5):441–449.
- Castillo, Y.M. (2018). Evaluación de riesgo de introducción del chinche globo de las leguminosas *Megacopta cribraria* Fabricus (Hemíptera: Plataspidae) a Nicaragua en las diferentes vías de ingreso. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Agraria. Consultada: 1 de mayo de 2021. Disponible en: <https://repositorio.una.edu.ni/3763/1/tnh10c352e.pdf>
- Chambilla-Chávez, D.C. (2019). Implementación de sistemas de información geográfica para el manejo integrado de la mosca de la fruta en SENASA. Consultada: 1 de mayo de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3R4ccP0>
- Compés-López, R., García-Álvarez, C.J.M. y Martínez-Gómez, V. (2019). Acuerdos comerciales, competitividad y crisis de citricultura valenciana. *Distribución y Consumo*. 38(3):38-46.
- Da Graça, V.J., Kunta, M., Park, J.W., González, M., Santillana, G., Mavrodieva, V., Duffel, N.M. and Dale, J. (2017). Occurrence of a citrus canker strain with limited host specificity in South Texas. *Plant Health Progress*. 18(4):196–203.
- Dewdney, M. M., Mongi Zekri, P. Roberts, D. and Burrow, J. D. (2019). Información para los propietarios: Cancro Cítrico. IFAS Extension, University of Florida. Consultado: 10 de enero de 2022. Disponible en: <https://bit.ly/3bOVhzF>
- Dita, M., Echegoyén-Ramos, P.E. y Pérez-Vicente, L.F. (2013). Plan de contingencia ante un brote de la raza 4 tropical de *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense En un país de la región del OIRSA. OIRSA, San Salvador, 155p. Consultado: 6 de febrero de 2022. Disponible en: <https://bit.ly/3OJfzH>
- Duyck, P.F y Quilici, S. (2002) Supervivencia y desarrollo de diferentes etapas de la vida de tres *Ceratitis spp.* (Diptera: Tephritidae) Criado a cinco temperaturas constantes. *Bulletin of Entomological Research*. 92:461–469.

- Enkerlin, W.J., Gutiérrez Ruelas, J.M., Pantaleón, R., Soto Litera, C., Villaseñor Cortés, A., Zavala López, J.L., Orozco Dávila, D., Montoya Gerardo, P., Silva Villarreal, L., Cotoc Roldán, E., Hernández López, F., Arenas Castillo, A., Castellanos Domínguez, D., Valle Mora, A., Rendón Arana, P., Cáceres Barrios, C., Jardín Medio, D., Villatoro Villatoro, C., Lira Prera, E., Zelaya Estradé, O., Castañeda Aldana, R., López Culajay, J., Ramírez y Ramírez, F., Liedo-Fernández, P., Ortiz Moreno, G., Reyes Flores, J., and Hendrichs, J. (2017). The Moscamed Regional Programme: review of a success story of area-wide sterile insect technique application. *Entomologia Experimentalis et Applicata*. 164(3):188–203.
- FAO-NIMF, No. 11. (2001). Normas Internacionales para Medidas Fitosanitarias. No 11. Análisis de Riesgo de Plagas para Plagas Cuarentenarias. Etapa 3: Manejo del Riesgo de Plagas. Consultado: 1 de marzo de 2022. Disponible en: <https://www.fao.org/3/Y3240S/y3240s08.htm>
- Garrett, K.A., Forbes, G., Gómez, L., González, M.A., Gris, M., Skelsey, P. and Sparks, A.H. (2013). Cambio climático, enfermedades de las plantas e insectos plaga. En: Jiménez Zamora, E. (Coord.). Cambio climático y adaptación en el altiplano boliviano. La Paz (Bolivia). CIDES-UMSA SANREM CRSP Universidad de Missouri Universidad Mayor de San Andrés; Fundación PROINPA; Universidad de la Cordillera; Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM); Universidad Estatal de Kansas; Universidad de Connecticut; Universidad del Estado de Iowa; Centro Internacional de la Papa (CIP). ISBN 978-99954-1-527-3. págs. 71-97.
- ICA. (2019) Instituto Colombiano Agropecuario. Consultado: 1 de marzo de 2022. Disponible en: <https://www.ica.gov.co/noticias/ica-pmu-control-fusarium>
- IICA. (2021). Se disparan alarmas en Perú y Ecuador por “pandemia” del banano y expertos piden cooperación público-privada para enfrentar la plaga. Consultado: 1 de marzo de 2022. Disponible en: <https://www.iica.int/es/prensa/noticias/se-disparan-alarmas-en-peru-y-ecuador-por-pandemia-del-banano-y-expertos-piden>
- Magarey, R. D., Fowler, G. A., Borchert, D. M., Sutton, T. B., Colunga-Garcia, M. and Simpson, J. A. (2007). Nappfast: An internet system for the weather-based mapping of plant pathogens. *Plant Disease*, 91:336–345.
- Margosian, M. L., Garrett, K. A., Hutchinson, J. M. S. and With, K. A. (2009). Connectivity of the American agricultural landscape: Assessing the national risk of crop pest and disease spread. *BioScience*. 59:141–151.
- Martínez-Solorzano, G.E., Rey-Brina, J.C., Pargas-Pichardo, R.E. and Manzanilla, E.E. (2020). Marchitez por Fusarium por raza tropical 4: Estado actual y presencia en el continente americano. *Agronomy Mesoamerican*. 31(1):259–276.
- Matsuura, M. and Sakagami, S.F. (1973). A Bionomic Sketch of the Giant Hornet, *Vespa mandarinia*, a Serious Pest for Japanese Apiculture». *Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University*. Series 6, Zoology 19 (1): 125-162. ISSN 0368-2188
- Muñoz-Burbano, C. A. (2019). GeoHLB: Visor Geográfico para el análisis espacial y temporal de los brotes de la enfermedad Huanglongbing (HLB) de los cítricos y su vector *Diaphorina citri* Kuwayama en la Zona Norte de Colombia. <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/16202>

- NIMF. No 6. (2018). Vigilancia. Consultado: 6 de abril de 2021. Disponible en: <https://www.fao.org/3/w7991s/W7991S.pdf>
- OIRSA. (2022). Marchitez por Fusarium en banano (*Fusarium oxysporum* f. sp. *ubense* Raza 4 Tropical). Consultado: 13 de mayo de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3yeDDNt>
- Ramsey, S.D. (2021). Foreign Pests as Potential Threats to North American Apiculture. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*. 37(3):545–558.
- Ricalde, M.P. Nava, D.E., Loeck, A.E., Donatti, M.G. (2012). Temperature-dependent development and survival of Brazilian populations of the Mediterranean fruit fly, *Ceratitidis capitata*, from tropical, subtropical and temperate regions. *Journal of Insect Science*. 12(33):1-11.
- SEMARNAT-CONANP. (2019). Región Planicie Costera y Golfo de México. Consultado: 4 de febrero de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3RbelID>
- SENASICA. (2019a). Cogollo racimoso del banano (*Banana bunchy top virus*). Dirección General de Sanidad Vegetal-Programa de Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria. Cd. de México. Ficha Técnica No. 31. 18 p. Ficha Técnica No. 32.15 p. Consultado: 5 de octubre de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3AmiwLO>
- SENASICA. (2019b). Cogollo racimoso del banano (*Banana bunchy top virus*). Dirección General de Sanidad Vegetal-Programa de Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria. Cd. de México. Ficha Técnica No. 31. 18 p. Ficha Técnica No. 32.15 p. Consultado: 5 de octubre de 2021. Disponible en: <https://bit.ly/3AmiwLO>
- Skendzic, S., Zovko, M., Pajac, I.Z., Lesic, V. and Lemic, D. (2021). The Impact of Climate Change on Agricultural Insect Pests. *Insects*. 12(5):440.
- Urbaneja, A., Pérez Hedro, M., Beitia, F., Monzó, C., Jaques, J.A. y Tena, A. y Navarro-Llopis, V. (2020). La gestión de plagas y la importancia de las nuevas aproximaciones biológicas y tecnológicas. *Vida Rural*. 480:30–37.
- Valera-Bernal, J. (2012). Los principios del método geográfico. Consultado: 10 de abril de 2019. Disponible en: <https://bit.ly/3agri3u>