

## Análisis geoespacial fitosanitario de la Fusariosis de las Musáceas a nivel global, con énfasis en América Pantropical

### *Phytosanitary geospatial analysis of Fusarium wilt of banana in the world with emphasis on Pantropical America*

Enrique Ibarra-Zapata,<sup>1</sup> Carlos Arturo Aguirre-Salado,<sup>2</sup> Liliana Miranda-Aragón,<sup>3</sup> Martín Escoto-Rodríguez,<sup>4</sup> Catarina Loredó-Ostí,<sup>5</sup> Gustavo Mora Aguilera,<sup>6</sup> Marcos Casiano-Domínguez,<sup>7</sup> Alejandro Iván Aguirre-Salado,<sup>8</sup> César Ramos-Méndez,<sup>9</sup> Nancy Villegas-Jiménez,<sup>10</sup> Carlos Ramón Urías-Morales,<sup>11</sup> y Rigoberto González-Gómez<sup>12</sup>

Recibido: 25/08/2021. Aprobado: 29/10/2021. Publicado: 30/11/2021.

**Resumen.** La comúnmente llamada Fusariosis de las musáceas es un patógeno que representa una amenaza para la seguridad alimentaria global. 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 vez primera en Colombia y se consideró un nuevo riesgo fitosanitario en América. Se modelaron los patrones espaciales de *Fusarium oxysporum*, f. sp. *cubense* raza 4 tropical (FocR4T) a nivel global y subcontinental (América pantropical) bajo un enfoque que integró los componentes

epidémico y espacial, e incluyó la distribución potencial (patógeno/hospedante) y el potencial de daño económico por asociación espacial de nodos comerciales (origen/destino), lo cual se integró mediante la evaluación multicriterio (MCDA). A nivel territorial 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 la América pantropical se determinó la existencia de 26 598 km<sup>2</sup> en riesgo fitosanitario muy alto (>0.9) ubicado por mayor extensión en Ecuador, Brasil, Mé-

<sup>1</sup> Facultad de Agronomía y Veterinaria. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2884-0362>

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3422-7193>

<sup>3</sup> Facultad de Agronomía y Veterinaria. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8140-1970>

<sup>4</sup> Facultad de Agronomía y Veterinaria. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0812-4484>

<sup>5</sup> Facultad de Agronomía y Veterinaria. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5221-2660>

<sup>6</sup> Postgrado de Fitosanidad. Colegio de Postgraduados. México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7641-3440>

<sup>7</sup> Facultad de Agronomía y Veterinaria. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5282-9895>

<sup>8</sup> Instituto de Física y Matemáticas. Universidad Tecnológicas de la Mixteca. México. <https://orcid.org/0000-0002-8516-4738>

<sup>9</sup> Organismo Internacional Regional de sanidad Agropecuaria OIRSA-Sede México.

<sup>10</sup> Organismo Internacional Regional de sanidad Agropecuaria OIRSA-Sede México.

<sup>11</sup> Organismo Internacional Regional de sanidad Agropecuaria OIRSA, El Salvador.

<sup>12</sup> Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. SENASICA (POFS).

xico, Guyana, Guatemala, Venezuela, Panamá y Colombia, aunque también existen 15.8 millones de km<sup>2</sup> 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.** The pathogen causing the so-called fusarium wilt of the Musaceae, *Fusarium oxysporum*, f. sp. Tropical Race 4 (Foc TR4), recently classified as *Fusarium odoratissimum* Maryani, Lombard, Kema & Crous, 2019, is a fungus that poses a phytosanitary threat to global food security. It is considered the most devastating disease affecting the genus *Musa*, accounting for considerable losses in banana production in the affected regions. Foc TR4 was first spotted in plantations of the Cavendish banana trees in Taiwan in 1967, then spreading to Malaysia, Java, Gran Canaria, the Philippines, and North Australia in the 1990s. In the 18 years that followed, it spread further to countries such as Laos, Vietnam, India, Myanmar, and Thailand; in other words, for nearly 30 years, its presence was restricted to Southeast Asia. However, during this period, there was the first transcontinental dispersal of fusarium into the Eastern hemisphere, spreading toward the Middle East and Africa, specifically Oman, Jordan, northern Mozambique, Lebanon, and Pakistan, then reaching Turkey in the year 2020. A transcontinental alert emerged again at the end of 2019 when Foc TR4 was first reported in America, specifically in La Guajira, Colombia, which certainly poses a potential threat to banana regions throughout America. The dispersal and potential establishment of Foc TR4 in the Americas can severely affect the regional economy and food security, where around 36.4% of global production is produced, with the marketing of some 14.5 million tons. Jointly, the Regional Agency for Agricultural Health (OIRSA\*), the Andean Community (CAN\*), the Southern Plant Health Committee (COSAVE\*), the North American Plant Protection Organization (NAPPO) as Regional Plant Protection Bodies (RPPBs), as well as the National Plant Protection Organizations (NPPOs) of the member countries and other

countries across the Americas, argue that the fusarium wilt of the Musaceae poses a continental phytosanitary threat due to potential adverse effects on the banana production chain. Therefore, the objective of this research was to characterize the areas facing a phytosanitary risk of Foc TR4 under different risk levels. We used a phytosanitary geospatial approach to identify potential scenarios for the introduction and establishment of the pathogen on a global scale, with a particular focus on pantropical America. The specific objectives were to: 1) model the environmental similarity of the pathogen/host using the Maxent or ecological niche model; 2) estimate the economic damage potential (EDP) derived from the spatial association of trade nodes (source/destination); and 3) estimate the phytosanitary risk of the fusarium wilt of the Musaceae through a multi-criteria spatial assessment at different geographic scales (global and sub-continental "pantropical America"). The phytosanitary geospatial analysis integrated epidemic and spatial components, facilitating the definition of focal areas facing the highest global phytosanitary risk in Southeast Asia (insular region), South Asia, Central Africa, and Madagascar) and South America, in addition to various regions of Central and North America where conditions exist for the spread of the disease. In the Americas, we estimated approximately 15.8 million km<sup>2</sup> with a phytosanitary risk, classified into five risk levels: very high, high, medium, low, and very low. A greater spatial resolution made possible to characterize the pantropical region of the Americas and identify the regions facing some level of phytosanitary risk in 2 countries in North America, 7 in Central America, 13 in South America, and 23 in the Caribbean region. However, there are territories with optimal characteristics for the establishment of the disease, i.e., potentially facing a very high phytosanitary risk (> 0.9), encompassing extensive areas in Ecuador, Brazil, Mexico, Guyana, Guatemala, Venezuela, Panama, and Colombia, which altogether encompass 26,598 km<sup>2</sup>, statistically supported by Moran's Index. The results obtained can be considered a technical/scientific tool with the potential to strengthen and focus actions to prevent the spread of this pathogen on the pantropical region of America. It is considered an input that can strengthen the traditional pest risk analysis (PRA) carried out by regional and national plant protection organizations.

**Keywords:** *Fusarium oxysporum* Tropical Race 4, fusarium wilt of the Musaceae, spatial analysis, banana, phytosanitary risk.

## INTRODUCCION

El propósito de este artículo es evidenciar las potencialidades que posee el modelado geoespacial en el fortalecimiento del Análisis de Riesgo de Plagas (ARP) en diferentes escalas geográficas, visualizado como una estrategia técnico-científica que apoya la toma de decisiones ante agentes patógenos que

ponen en riesgo la seguridad agroalimentaria. De manera específica, el riesgo fitosanitario que representa el hongo *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Raza 4 Tropical (FocR4T), recientemente clasificado como *Fusarium odoratissimum* (Maryani, Lombard, Kema y Crous, 2019) considerado una amenaza latente para la producción de plátano y banano en las zonas productoras del mundo.

A nivel mundial, las plagas y enfermedades agrícolas son responsables de pérdidas entre 20 y 40% de la productividad de los cultivos alimenticios (Bouwmeester *et al.*, 2016). Específicamente, FocR4T puede afectar platanos de América pantropical, que en términos de producción alimentaria se consideran el cuarto cultivo más importante del mundo después del arroz, el trigo y el maíz, y de importancia económica de algunos países en desarrollo (Molina *et al.*, 2008).

FocR4T 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.*, 2015). La primera detección en América representa 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). Aquí 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), 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, y la 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 la humanidad mediante el movimiento de productos agrícolas a nivel global, denominado PDE.

El objetivo de este trabajo fue caracterizar las áreas potenciales bajo algún nivel de riesgo fitosanitario de *Fusarium oxysporum*, f. sp. *cubense* 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 en diferentes escalas.

## 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 parte 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 solo presencia  $Pr(y=1 | x(z))$  toma la forma de una regresión logística con la interceptada estimada por la entropía de  $q_\lambda$ , 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  $q_\lambda$  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  $Z_\lambda$  es una constante de normalización que asegura que las probabilidades  $q_\lambda$

sumen 1 en el área de estudio.  $H$  es la entropía de la función de densidad  $q_{\lambda}$  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 1. Como complemento se identificaron 61 localizaciones de hospedantes de importancia económica distribuidas en América pantropical (Cuadro 2).

La caracterización ambiental 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 ambientales 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 explicativa (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 del periodo de 2013 a 2017, conforme la fracción

Cuadro 1. Sitios de presencia de FocR4T empleados en la modelación de la ACP (54).

Detecciones	Área geográfica	Región	Fuente
1	Isla Mayotte	África	Aguiar <i>et al.</i> , (2020)
3	Uttar Pradesh, Kushi Nagar y Ambedkar Nagar en India.	Asia	Damodaran <i>et al.</i> , (2019)
34	Kalimantan, 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> , (2015)

Cuadro 2. Sitios de presencia del hospedante empleados en la modelación de la ACH (61).

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), Cedeno-García <i>et al.</i> , 2016 (4 sitios).

Cuadro 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 (desviación 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 (coeficiente de variación)	%
	BIO16	Precipitación del trimestre más húmedo	mm
	BIO17	Precipitación del trimestre más seco	mm
	BIO18	Precipitación del trimestre más cálido	mm
	BIO19	Precipitación del trimestre más frío	mm

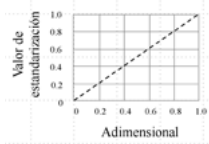
arancelaria 0803 (CCI, 2016); 2) intersectar con la base de datos global de EPP0 (2020), conforme con la situación fitosanitaria del patógeno; 3) determinar los flujos de comercialización entre nodos (origen *vs* destino); 4) construir una base de datos espacial para dimensionar la producción de material 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, 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).

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 así obtener una estimación del RF\_FocR4T,

Cuadro 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	
2	ACH	Ambiente favorable para el establecimiento del hospedante	adimensional	0-1	
3	PDE	Flujos de material vegetativo	ton/año	31-3,353,600	

(CLP: 0.0-1.0)

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).

Para evaluar la relación estadística existente entre las variables explicativas 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.

## 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, con porciones diversas en Centro y Norteamérica (Figura 1, superior).

El grado de contribución a la variabilidad espacial de la posible distribución del patógeno se logró

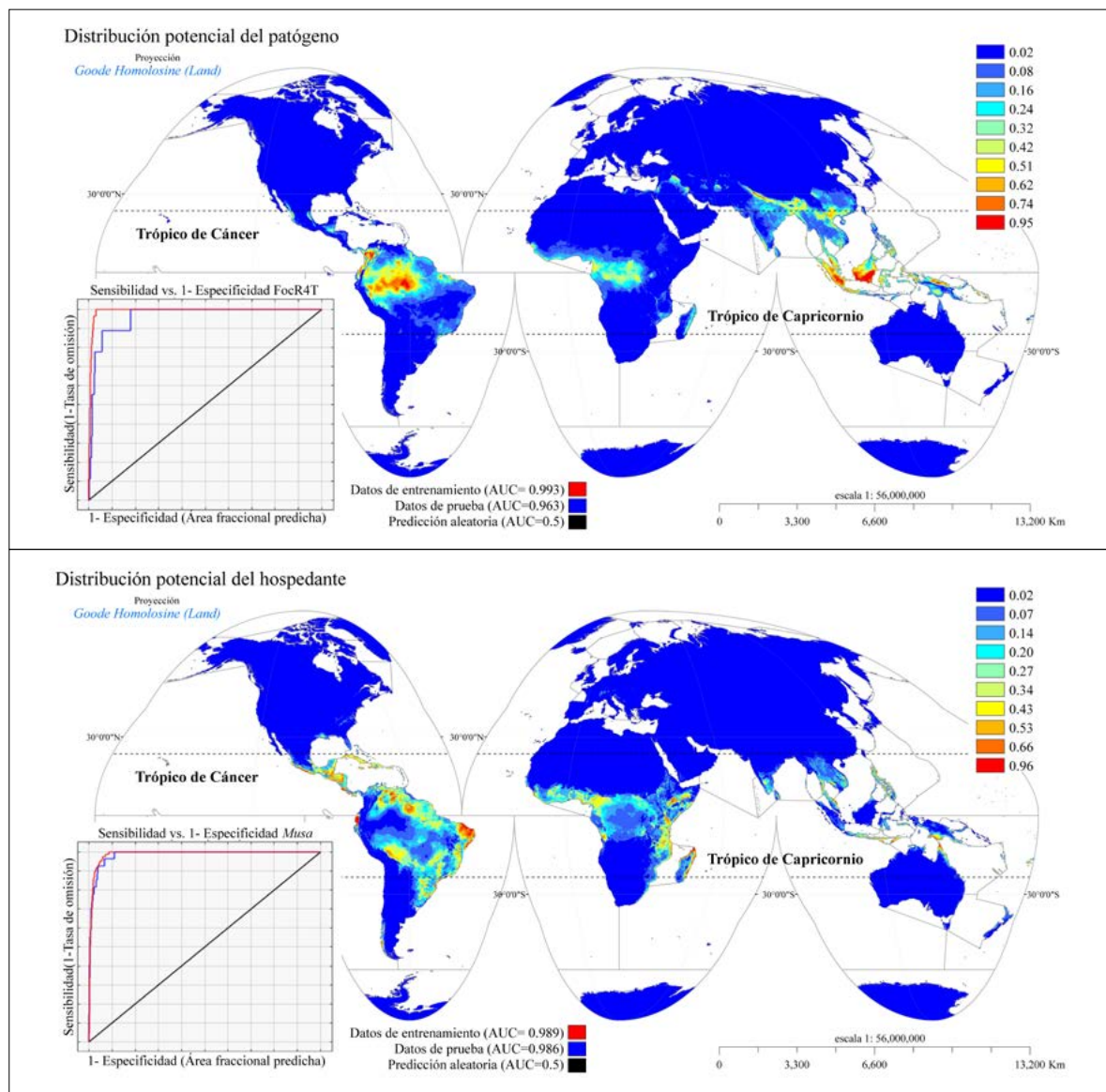


Figura 1. Modelo de Máxima Entropía. Aptitud climática del patógeno (superior) y Aptitud climática del hospedante (inferior).

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 5).

Como complemento, los lugares que presentan condiciones ambientales que favorecen la ACH (plátano) se distribuyen en el centro norte de Sudamérica, en países como Brasil, Perú, Ecuador y Colombia (Figura 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 COR: 0.978 (Cuadro 5).

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 durante 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 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 2).

Cuadro 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

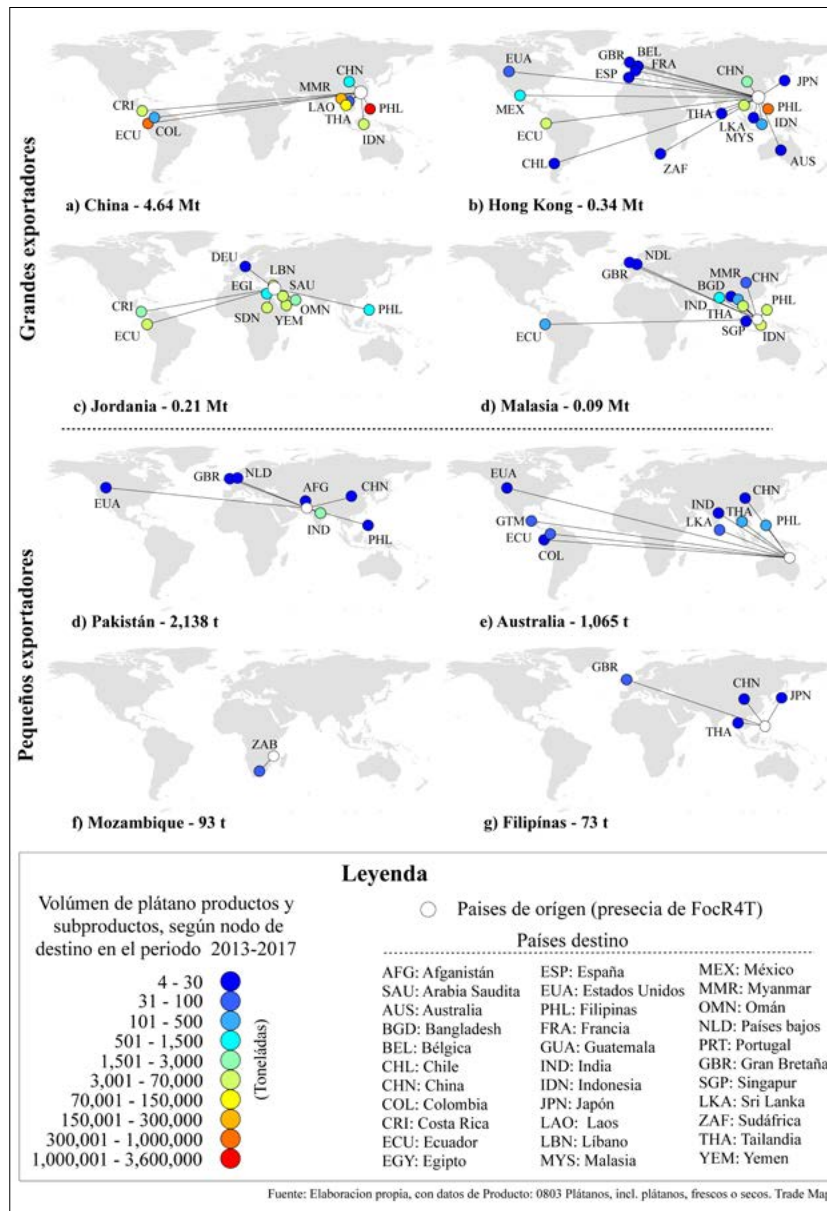


Figura 2. Modelo de PDE por movilidad de material vegetativo (genere *Musa*).

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 km<sup>2</sup> 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 2366.4 km<sup>2</sup> (8.015%), distribuidos en Indonesia, Tailandia, Camboya,

Malasia, Filipinas, Timor Leste y el norte de Australia; b) el Sureste de África, con una superficie de 434.06 km<sup>2</sup> (1.46 %), distribuida en Madagascar, Mozambique, Malawi y Kenia; c) en África Occidental 7.56 km<sup>2</sup> (0.025 %), en la región de Liberia y d) la región pantropical de América, de mayor extensión, con 26 758.9 km<sup>2</sup> (90.5%), que se distribuye en Perú, Guyana, Ecuador, México, Panamá, Venezuela, Colombia, Guatemala y Brasil (Figura 3).



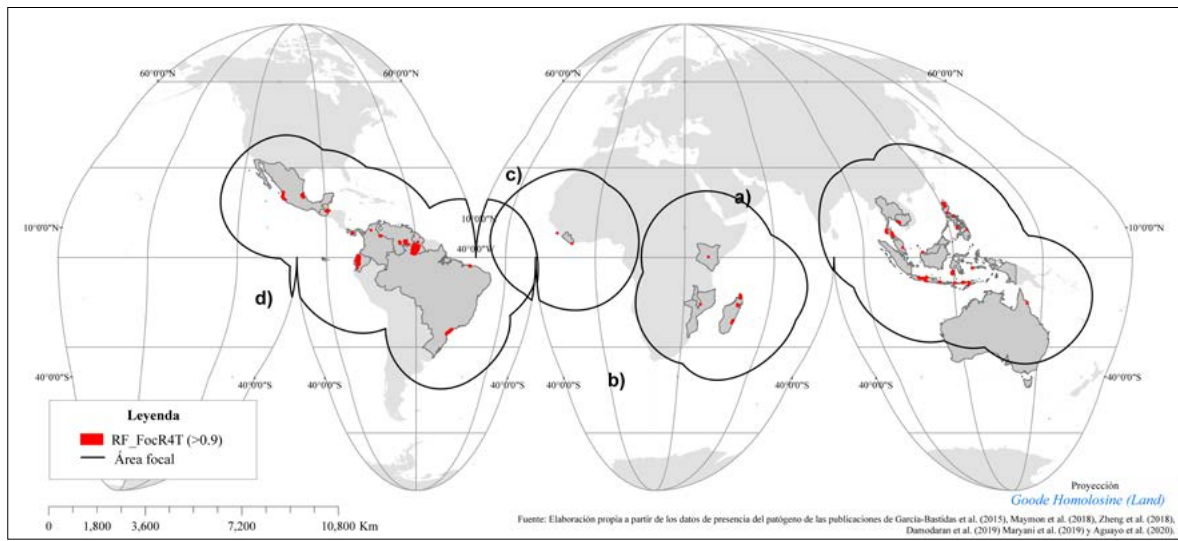


Figura 3. Áreas focales y superficies prioritarias en RF\_FocR4T muy alto (> 0.9).

A escala subcontinental, en la región pantropical de América (Figura 4) se identificaron 15.8 millones de km<sup>2</sup> con algún nivel de RF\_FocR4T, lo cual se refleja en el Cuadro 6, donde se puede observar la superficie estimada por nivel de RF\_FocR4T en los 45 países identificados.

Con mayor detalle, en la Figura 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.

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 con respecto a la

distribución espacial del RF\_FocR4T, con valores mínimos en la zona cercana al Ecuador (Cuadro 7).

Lo anterior revela que la tendencia de la predicción del riesgo fitosanitario de la Fusariosis de la musáceas se da 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 al ecuador presentan las mejores condiciones para el desarrollo de la enfermedad, sin restarle importancia a las zonas con menor nivel de riesgo distribuidas en América pantropical, visibles en la Figura 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

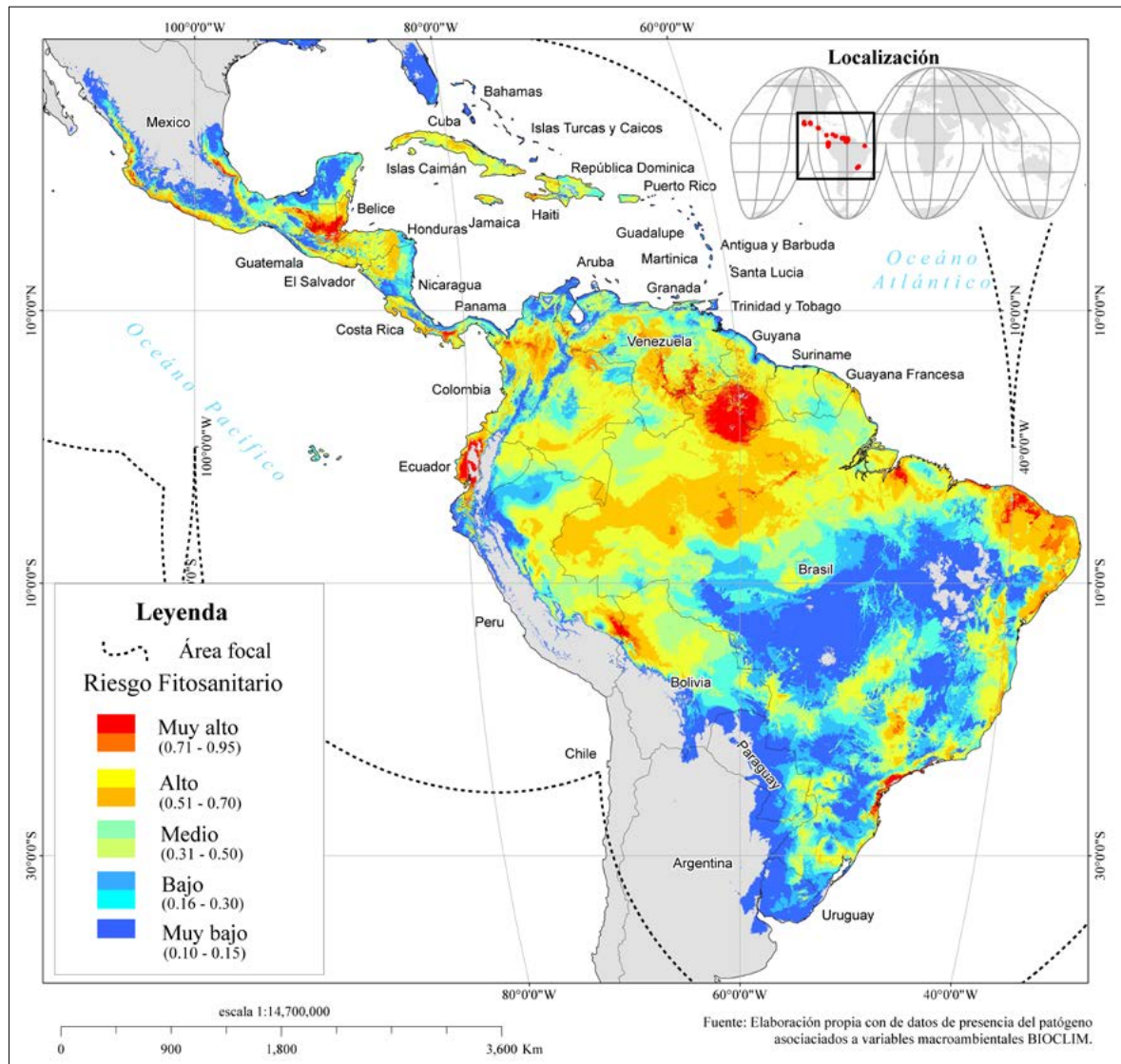


Figura 4. Distribución espacial del RF\_FocR4T en América pantropical.

térmica se estima un mayor RF. Lo anterior revela que la temperatura juega un papel importante en el desarrollo de la enfermedad.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Nuestros resultados se asemejan a los obtenidos por Salvacion *et al.* (2019a), ya que la posible ocurrencia

de FocR4T está muy relacionada a condiciones de menor variabilidad climática territorialmente en superficies próximas 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 pa-

Cuadro 6. Niveles de RF\_FocR4T localizados en América pantropical.

Región	País	Porcentaje del área total identificada por país y a nivel de RF_FocR4T (%)							Área total por país según nivel de RF_FocR4T (km2)	Porcentaje del área identificada en 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	9.38	15.52	7.57	2.17	1.78	0.51	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										1 069 389.996.75	6.75
Centro	Nicaragua	12.74	17.14	20.72	11.63	15.72	21.73	0.31			113 151.46	0.84
	Honduras	2.5	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
	Belize	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	0.01	1 136 725.73	7.15.347
	Venezuela	6.01	6.14	13.59	21.12	29.28	18.49	3.39	1.97	0.01	919 696.09	5.8
	Bolivia	13.84	7.30	17.09	24.42	28.03	7.49	1.27	0.56		845,814.43	5.34
	Perú	16.31	12.72	10.03	19.97	31.75	7.90	0.82	0.67		839 690.29	5.3
	Paraguay	64.62	16.16	8.13	6.00	4.98	0.12	0.01	0.1		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	1.3
	Surinam	2.47	0.74	8.33	29.3	55.32	3.83	0.01			145 688.92	0.92
G. Francesa	0.91	2.15	20.54	23.35	45.63	7.18	0.23	0.01		83 701.95	0.53	
	Chile	100								275.22	0.01	
	Subtotal										13 989 550.46	88.27

Cuadro 6. Continuación.

Región	País	Porcentaje del área total identificada por país y a nivel de RF_FocR4T (%)							Área total por país según nivel de RF_FocR4T (km2)	Porcentaje del área identificada en América pantropical (%)	
		<0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8			0.9
Caribe	Cuba	4.27	1.56	1.63	17.37	60.65	14.04	0.49	123 628.39	0.78	
	R. 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	29 355.49	0.19	
	Bahamas	93.69	5.19	1.10	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			9672.60	0.06	
	T y Tobago	80.29	7.00	4.56	2.01	6.14			5052.35	0.03	
	Guadalupe	88.91	11.09						1671.15	0.01	
	Martinica	75.29	24.22	0.49					1102.69	0.01	
	Dominica	42.40	56.48	1.12					773.23	0.005	
	Santa Lucía	60.39	37.80	1.81					635.8	0.004	
	A y Barbuda	100							448.24	0.003	
	Barbados	100							444.92	0.003	
	San Vicente	60.52	37.36	1.88	0.24				344.96	0.002	
Granada	86.00	14.00						320.93	0.002		
Islas Turcas	60.40	39.60						298.49	0.002		
Islas Vírgenes	98.23	1.77						283.92	0.002		
Antillas	100							277.93	0.002		
Islas Caimán	100							185.43	0.001		
San Cristóbal	91.96	8.04						167.75	0.001		
Montserrat	84.36							107.13	0.001		
Islas Británicas	95.68							84.08	0.001		
Anguila	100							64.61	0.0004		
								Subtotal	249 864.45	1.58	
Total		21.75	11.13	11.76	14.52	23.5	13.40	2.05	1.73	0.17	15 848 524.00

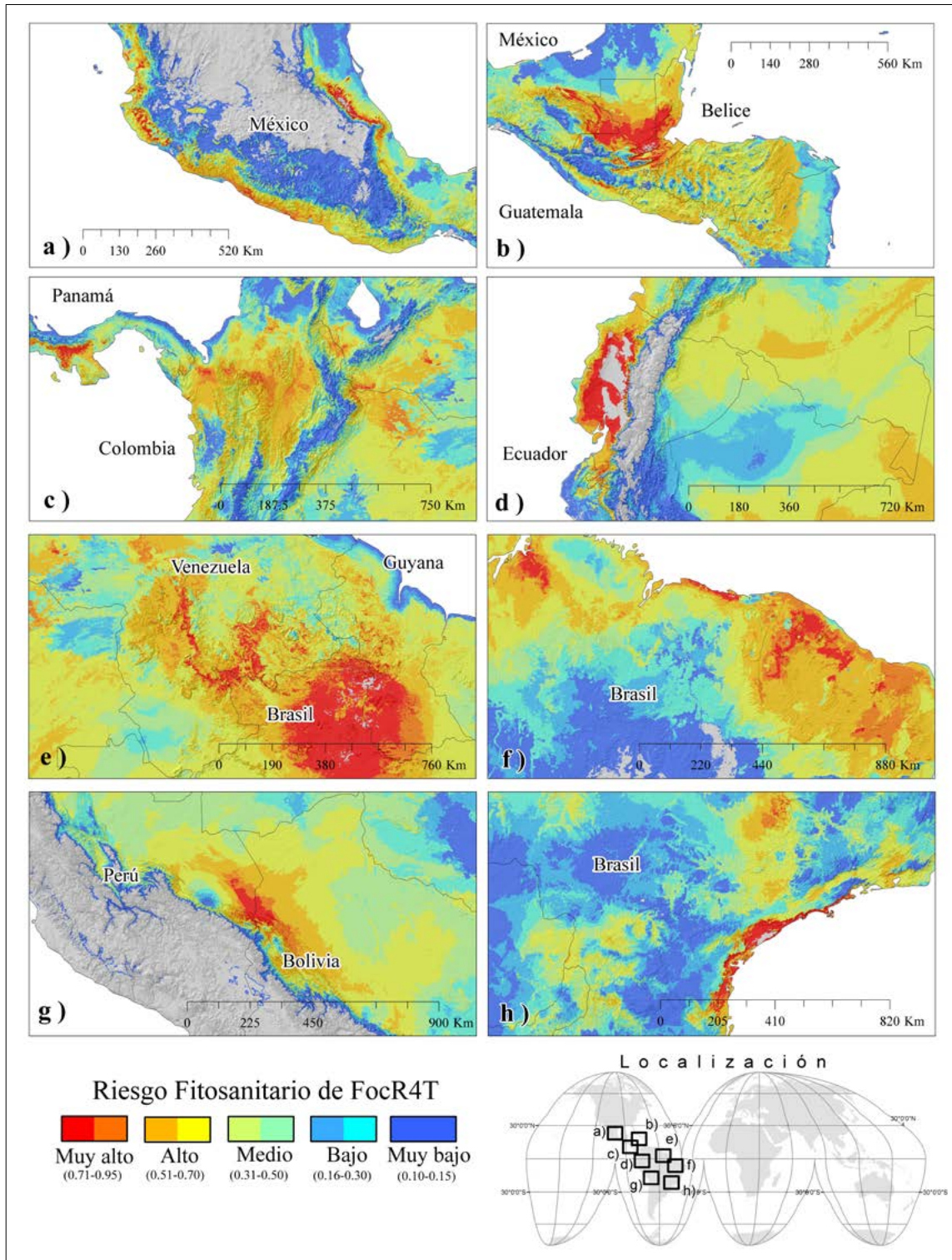


Figura 5. Regiones prioritarias con mayorRF\_FocR4T en América pantropical.

Cuadro 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.

tógeno, hay quienes concluyen que para 2050 hasta un 91% de áreas aptas para cultivo de banano en Filipinas estarán infectadas de FocR4T (Salvacion *et al.*, 2019b).

La totalidad de la región de América pantropical presentó 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 afectación en Sudamérica son Brasil, Colombia, Venezuela y Perú, principalmente; para el caso de Centroamérica son Nicaragua, Honduras, Guatemala y Panamá entre otros; para el Caribe serían Cuba, República Dominicana, Haití, Bahamas, Jamaica, entre otros, y para Norteamérica, solo México.

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 a 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 robustos 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, 2015; SENASICA, 2019).

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 información reciente de movilidad de material vegetal propagativo, lo que permite 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.

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.

## REFERENCIAS

- Aguayo, J., Cerf, I., Folscher, A. B., Fourrier-Jeandel, C., Ioos, R., Matthews, M. C., Mostert, D., Renault, R., Wilson, V. y Viljoen, A. (2020). First report of *Fusarium oxysporum*, f. sp. *cubense* tropical race 4 (TR4) causing banana wilt in the Island of Mayotte. *APS*. <https://dx.doi.org/10.1094/PDIS-06-20-1196-PDN>
- Arendt, W. J., Tórrez, M. y Vilchez, S. (2012). Diversidad de Aves en Agropaisajes en la Región Norte de Nicaragua. *International Institute of Tropical Forestry, Ornithology Neotropical*, 23. <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/40855>
- Bouwmeester, H., Heuvelink, G. B. M. y Stoorvogel, J. J. (2016). Mapping crop diseases using survey data: the case of bacterial wilt in bananas in the East African highlands. *European Journal Agronomy*, 74. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2015.12.013>
- CCI. (2016). Centro de Comercio Internacional. International Trade Statistics. Disponible en <https://bit.ly/2EMl5qQ>
- Cedeño-García, G., Soplín-Villacorta, H., Helfgott-Lerner, S., Cedeño-García, G. y Sotomayor-Herrera, I. (2016). Aplicación de biorreguladores para la macro-propagación del Banano cv. Williams en cámara térmica. *Agronomía Mesoamericana*, 27(2.) DOI: <http://dx.doi.org/10.15517/am.v27i2.24390>
- Corbi, J. J., Kleine, P., Trivinho Strixino, S. y 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. <https://www.redalyc.org/pdf/429/42955126004.pdf>
- Damodaran, Y., Mishra, V. K., Jha, S. K., Gopal, R., Rajan, S. y Ahmed, I. (2019). First Report of *Fusarium Wilt* in Banana Caused by *Fusarium oxysporum*, f. sp. *cubense* Tropical Race 4 in India. *International Journal of Applied Plant Pathology plant disease*, 103(5). <https://doi.org/10.1094/PDIS-07-18-1263-PDN>
- De la Pava, N., García, M. A., Brochero, C. E. y Sepúlveda-Cano, P. A. (2020). Records of *Dryophthorinae* (Coleoptera: Curculionidae) on Colombian Caribbean Coast. *Acta Biológica Colombiana*, 25(1). <http://dx.doi.org/10.15446/abc.v25n1.77797>
- Dita, M., Barquero, M., Heck, D., Mizubuti, S. G. E. y 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. <https://dx.doi.org/10.3389/fpls.2018.01468>
- Donatelli, M., Magarey, R. D., Bregaglio, S., Willocquet, L., Whish, J. P. M. y Savary, S. (2017). Modelling the impacts of pests and diseases on agricultural systems. *Agricultural Systems*, 155. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.019>
- Dyer, E. E., Cassey, P., Redding, D. W., Collen, B., Frank, V., Gaston, K. J., Jones, E. K., Kark, S., Orme, L. C. D. y Blackburn, M. T. (2017). The global distribution and drivers of alien bird species richness. *PLoS Biology*, 15(1). DOI: <https://dx.doi.org/10.1371/journal.pbio.2000942>
- 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. <http://www.fao.org/3/a-i5116s.pdf>
- EPPO. (2020). Database Panama disease. European and Mediterranean Plant Protection Organization. <https://gd.eppo.int/taxon/FUSAC4/distribution/CO>
- FAO. (1995). Directrices para la exportación, el envío, la importación y liberación de agentes de control biológico y otros organismos benéficos. NIMF No 3. <http://www.fao.org/3/a-j5365s.pdf>
- Fick, S. E. e Hijmans, R. J. (2017). Worldclim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12). <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Fielding, A. H. y Bell, J. F. (1997). A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental Conservation*, 24(1). DOI: <https://doi.org/10.1017/S0376892997000088>
- García-Bastidas, F., Ordoñez, N., Konkol, J., Al-Qasim, M., Naser, M., Abdelwali, N., Salem, C., Waalkijh, C., Ploetz, R. C. y Kema, G. H. J. (2015). First Report of *Fusarium oxysporum*, f. sp. *cubense* Tropical Race 4 associated with Panama Disease of banana outside Southeast Asia. *Plant Disease*, 98(5). <http://doi.org/10.1094/PDIS-09-13-0954-PDN>
- Lira-Noriega, A., Soberón, J. y 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). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28517-4>
- Maryani, N., Lombard, L., Poerba, Y. S., Subandiyah, S., Crous, P. W. y 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. <https://doi.org/10.1016/j.simyco.2018.06.003>

- 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. y 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). <https://doi.org/10.1094/PDIS-05-18-0822-PDN>
- Molina, A., Fabregar, E., Sinohin, V. G., Herradura, L., Fourie, G. y Viljoen, A. (2008). Confirmation of tropical race 4 of *Fusarium oxysporum*, f. sp. *cubense* infecting Cavendish bananas in the Philippines. *Biodiversity International*. <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/67451>
- OIRSA. (2019). Análisis de Riesgo *Fusarium oxysporum*, f. sp. *cubense* raza 4 Tropical (Foc R4T). Organismo Internacional Regional de Sanidad Agropecuaria. <https://bit.ly/3keq33L>
- Orr, R. y Nelson, P. (2018). Impacts of soil abiotic attributes on Fusarium wilt, focusing on bananas. *Applied Soil Ecology*, 132. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.06.019>
- Peng, H. X., Sivasithamparam, K. y Turner, D. W. (1999). Chlamyospore 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). <https://bit.ly/2JRwrRP>
- Pérez-Vicente, L., Dita, R. M. A. y 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). Disponible en <http://www.fao.org/3/a-br126e.pdf>
- Phillips, S. J. y Dudík, M. (2008). Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31, 161-175. <https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x>
- Phillips, S.J., Anderson, R.P. and Schapire, R.E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modeling*, 190(3). <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Pitt, J. P. W., Worner, S. P. y Suarez, A. V. (2009). Predicting Argentine ant spread over the heterogeneous landscape using a spatially explicit stochastic model. *Ecological Applications*, 19. <https://doi.org/10.1890/08-1777.1>
- Ramos-Hernández, E., Sol-Sánchez, A., Guerrero-Peña, A., Obrador-Olán, J. y Carrillo-Ávila, E. (2011). Efecto de *Arachis pintoi* sobre las Arvenses asociadas al plátano macho (*Musa aab*), Cárdenas, Tabasco, México. *Agronomía Mesoamericana*, 22(1). [http://www.mag.go.cr/rev\\_meso/v22n01\\_051.pdf](http://www.mag.go.cr/rev_meso/v22n01_051.pdf)
- 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. *Revista Científica*, 18(30), 29-32. DOI: <https://doi.org/10.5377/calera.v18i30.7736>
- Salvacion, A. R., Cumagun, C. J. R., Pangga, I. B., Magcale-Macandog, D. B., Sta Cruz, P. Saludes, R. B., Solpot, T. C. y Aguilar, E. A. (2019b). Banana suitability and Fusarium wilt distribution in the Philippines under climate change. *Spatial Information Research*. <https://doi.org/10.1007/s41324-019-00239-3>
- Salvacion, A. R., Solpot, T. C., Cumagun, C. J. R., Pangga, I. B., Magcale-Macandog, D. B., Sta. Cruz, P. C., Saludes, R. B. y Aguilar, E. A. (2019a). Exploring environmental determinants of Fusarium wilt occurrence on banana in South Central Mindanao, Philippines. *Plant Protection Journal*, 12(2). DOI: <https://doi.org/10.2478/hppj-2019-0008>
- Schaafsma, W. y Van Vark, G. N. (1979). Classification and discrimination problems with applications. *Statistica Neerlandica*, 33. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9574.1979.tb00666.x>
- SENASICA. (2019). *Manual Técnico Operativo. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural*. Servicio Nacional de Inocuidad y Calidad Alimentaria. CNRF-PVEF. <https://bit.ly/35KO8K9>
- Siamak, S. B. y 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). <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2018.08.001>
- 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). <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43617800007>
- Sol-Sánchez, A., Gómez-García, E., García-López, E. y Pérez-Vázquez, A. (2016). Flora útil en el Ejido Sinaloa 1a sección, Cárdenas, Tabasco, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 14. <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v7nsp14/2007-0934-remexca-7-spe14-2671.pdf>
- Thangavelu R., Raj, E. E., Pushpakanth, P., Loganathan, M. y Uma, S. (2020). Draft Genome of *Fusarium oxysporum*, f. sp. *cubense* Strain Tropical Race-4 Infecting Cavendish (AAA) Group of Banana in India. *APS Publications*. <https://doi.org/10.1094/PDIS-06-20-1170-A>
- 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. DOI: <https://doi.org/10.3391/mbi.2018.9.2.05>  
West, A. M., Kumar, S., Brown C. S., Stohlgren, T. J. y Bromberg, J. (2016). Field validation of an invasive species Maxent model. *Ecological Informatics*, 36. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2016.11.001>  
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., Douangbouppha, B., Khaing, A. A., Drenth, A., Seidi, M. F., Meijer, H. J. G. y 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). DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00457>