

# **Análisis de riesgo potencial de Huanglongbing a través de tecnología geoespacial en Colombia**

 Luis Alberto Olvera-Vargas<sup>1\*</sup>,  Ángel de Jesús Quiroz Gaspar<sup>2</sup>,  David Israel Contreras-Medina<sup>1</sup>,  Noé Aguilar-Rivera<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C. Guadalajara, México

<sup>2</sup> Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis de Potosí, México

<sup>3</sup> Universidad Veracruzana. Córdoba, México

\* Autor de correspondencia: Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C. Av. Normalistas 800 Colinas de La Normal, 44270, Guadalajara, Jalisco, México. lolvera@ciatej.mx.

Recibido: 09 de agosto de 2019

Aceptado: 17 de febrero de 2020

Publicado: 30 de junio de 2020

*Editor temático:* Lumey Pérez Artilles (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [AGROSAVIA])

*Para citar este artículo:* Olvera-Vargas, L. A., Quiroz Gaspar, A. J., Contreras-Medina, D. I., & Aguilar-Rivera, N. (2020). Análisis de riesgo potencial de Huanglongbing a través de tecnología geoespacial en Colombia. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 21(3), e1552. [https://doi.org/10.21930/rcta.vol21\\_num3\\_art:1552](https://doi.org/10.21930/rcta.vol21_num3_art:1552)

## Resumen

Huanglongbing (HLB) es una de las enfermedades más destructivas que afecta a los cítricos en el mundo. En el continente americano, HLB se detectó primero en Brasil y posteriormente en Florida (Estados Unidos). Las áreas citrícolas de Colombia se mantuvieron libres de la enfermedad hasta que en abril de 2016 el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) declaró en cuarentena fitosanitaria al departamento de La Guajira por la presencia de HLB. En ese momento se intensificaron las acciones de control y erradicación; sin embargo, el informe del primer semestre de 2018 elaborado por el ICA reportó la presencia de HLB en seis departamentos del norte de Colombia. El presente estudio propone una metodología para analizar el riesgo potencial de HLB y su insecto vector *Diaphorina citri* mediante el uso de tecnología geoespacial, que permite determinar la ubicación de plantas hospederas, grados días de desarrollo del vector y variables bioclimáticas. Los resultados señalan que cerca del 15 % de las áreas citrícolas de Colombia se encuentra en un alto riesgo a la presencia de la enfermedad. Esta metodología se presenta como una opción para el monitoreo de la enfermedad a escala regional, ya que es automatizable y tiene una dinámica espacio-temporal alta que puede ser utilizada para la detección temprana de HLB.

**Palabras clave:** control de enfermedades de plantas, HLB, sistemas de información geográfica, sistemas de vigilancia, tecnología (geoespacial)

## Potential risk analysis of Huanglongbing through geospatial technology in Colombia

### Abstract

Huanglongbing (HLB) is the most destructive disease that currently impacts citrus in the world. HLB was first detected in the Americas in Brazil and then in Florida (the United States). The citrus growing areas of Colombia were free of the disease, but in April 2016, Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) declared phytosanitary quarantine in the department of La Guajira due to the presence of HLB. At that time, the control and eradication actions were intensified; nonetheless, the report of the first half of 2018 prepared by ICA reported the presence of the HLB in six departments in northern Colombia. This study proposes a methodology to analyze the potential risk of HLB and its vector *Diaphorina citri*, through the use of geospatial technology, considering the location of plant hosts, the development time of the insect host in degree-days and bioclimatic variables. The results indicate that about 15 % of the citrus areas are at high risk of the presence of HLB. This method is presented as an option for monitoring the disease on a regional scale, which is also characterized by being automated, with high spatio-temporal dynamics, and can be used for early detection of the disease.

**Keywords:** geographical information systems, HLB, plant disease control, surveillance systems, technology (geospatial)

## Introducción

Huanglongbing (HLB) es una de las enfermedades más destructivas que actualmente afectan a los cítricos en el mundo y la causa del derribo de millones de árboles (Da Graça et al., 2016). El continente americano se encontraba libre de HLB hasta que en marzo de 2004 se detectó en Brasil y en agosto de 2005, en el estado de Florida (EE. UU.) (Bové, 2006). La enfermedad está asociada a tres especies de  $\alpha$ -proteobacterias: *Candidatus Liberibacter asiaticus* (*Ca. L. asiaticus*), *Candidatus Liberibacter africanus* (*Ca. L. africanus*) y *Candidatus Liberibacter americanus* (*Ca. L. americanus*) (Jagoueix et al., 1994; Do Carmo Teixeira et al., 2005). Estas bacterias son endopatógenos obligados cuya presencia está restringida a los tejidos del floema en las plantas infectadas (Da Graça et al., 2015; Da Graça, 2008; Do Carmo Teixeira et al., 2005). En el continente americano, la especie predominante es *Ca. L. asiaticus*, aunque en Brasil también se encuentra *Ca. L. americanus* (Santivañez et al., 2013). Ambas bacterias son transmitidas por *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Liviidae), el psílido asiático de los cítricos y principal vector de HLB, que se hospeda en al menos 25 géneros de la familia Rutaceae, incluyendo todas las variedades de cítricos comerciales (Bové, 2006; Pérez-Artiles et al., 2017). La enfermedad afecta severamente a naranjos dulces *Citrus sinensis* (L.) Osbeck, mandarinos *Citrus reticulata* Blanco y limoneros *Citrus x limon* (L.) Osbeck. En menor grado perjudica a limeros *Citrus aurantifolia* Swingle y pomelos *Citrus x paradisi* Macfad., y a los hospederos silvestres *Murraya paniculata* (L.) Jack y *Swinglea glutinosa* (Blanco) Merr., que resultan importantes debido a su presencia en áreas urbanas como plantas ornamentales (Centre for Agricultural Bioscience International [CABI], 2020; Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural & Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria, 2019).

El primer registro de *D. citri* en Sudamérica se dio en São Paulo (Brasil) en el año de 1942; posteriormente se reportó en otros países de la región: Argentina (Entre Ríos) en 1984, Uruguay en 1991, Estados Unidos (Florida) en 1998, Cuba en 1999, México (Campeche) en 2002, Bolivia en 2004 y Paraguay en 2008 (CABI, 2020; European and Mediterranean Plant Protection Organization [EPPO], 2020a; Hall et al., 2013). En Colombia, la presencia de *D. citri* se informó por primera vez en 2007 en los departamentos de Tolima y Valle del Cauca (Ebratt et al., 2011; King, 2012; Kondo et al., 2012). Más tarde, se detectó en los departamentos de Antioquia, Atlántico, Caldas, Casanare, Cesar, Córdoba, Cundinamarca, Bolívar, Cauca, Huila, Meta, Nariño, Norte de Santander, Quindío, Risaralda, Santander y Vichada (Ángel et al., 2014). Actualmente, está presente en 25 departamentos del país (Resolución 1668, 2019).

En cuanto a la enfermedad de HLB, después de las detecciones en Brasil y el estado de Florida (EE. UU.), con el tiempo su presencia se registró en varios países: Cuba en 2006, República Dominicana (Santo Domingo), EE. UU. (estado de Louisiana) en 2008, México (estados de Jalisco, Nayarit y Yucatán) y Belice en 2009 (EPPO, 2020b; CABI/EPPO, 2017). En Colombia se detectó por primera vez en plantas cítricas

en el departamento de La Guajira en noviembre de 2015 (Resolución 2390, 2015). Actualmente se han informado 333 casos positivos para HLB en 27 municipios de los departamentos de Atlántico, Magdalena, Cesar, Bolívar, La Guajira y Norte de Santander (Instituto Colombiano Agropecuario [ICA], 2018).

La propagación de la enfermedad dentro del continente americano no tiene una explicación científica precisa, debido tal vez a la falta de datos, la complejidad sintomatológica de la enfermedad o la dificultad de encontrar reportes exactos y tempranos. Los casos en Brasil, posiblemente procedentes de Asia o África, tienen una alta probabilidad de ser consecuencia de la dispersión de material vegetal contaminado por el hombre (Do Carmo Teixeira et al., 2005). En Florida (EE. UU.), la causa más probable fue el transporte de material infectado proveniente de Asia, África o Brasil (Hall et al., 2013). En Cuba, HLB pudo haber provenido de Florida por la dispersión de *D. citri* infectivos o por la movilización de material vegetal (Beattie et al., 2008; Da Graça, 2008). La dispersión de *D. citri* infectivos pudo ser activada entre los países del Caribe y Centroamérica debido a la gran cantidad de huracanes que abatieron la zona durante estos años o por la movilización de material infectado causada por el turismo internacional (Galindo, 2014). En el caso de Colombia, aún no se han definido las vías de entrada de HLB.

En 2007, Colombia no tenía ningún reporte oficial del ingreso de HLB, aun cuando desde dicho año se contaba con la presencia de *D. citri* en material de propagación de lima ácida Tahití y en un seto de swinglea en el departamento de Tolima (King, 2012). En 2010 se realizaron actividades de monitoreo y rastreo en 32 municipios de 17 departamentos; Atlántico, Cauca, Cesar, Meta y Santander no presentaron rastro de *D. citri* (ICA, 2010). Para 2014, las actividades de monitoreo se intensificaron en 434 municipios de 26 departamentos, principalmente en las áreas productoras de cítricos en Colombia. Como resultado de las inspecciones se determinó que *D. citri* se encontraba presente en todas las áreas sembradas con cítricos; sin embargo, en ninguna de ellas se detectó la presencia de la enfermedad (ICA, 2014). En 2015, el laboratorio de diagnóstico fitosanitario del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) confirmó los dos primeros casos de HLB en los municipios de Distracción y Fonseca, departamento de La Guajira (Resolución 2390, 2015).

Con base en lo anterior, la dispersión de psílidos infectivos y el movimiento de material vegetal con HLB representan un serio riesgo para la citricultura en Colombia. Aunque la enfermedad no se encuentra de forma extendida, las experiencias en otros países latinoamericanos indican que debe haber una extensa y dinámica vigilancia (Santivañez et al., 2013) para evitar la diseminación de HLB, que incluya acciones para un control eficiente de *D. citri*, entre otras medidas. En ese sentido, el objetivo de este trabajo es presentar una propuesta metodológica para analizar el riesgo potencial de HLB en Colombia mediante el uso de tecnología geoespacial, específicamente sensores remotos y sistemas de información geográfica, que permitan determinar la ubicación de hospederos vulnerables, las áreas climáticamente idóneas y el número de generaciones de *D. citri* que podrían formarse bajo ciertas condiciones ambientales. Los datos consolidados podrían servir como insumo para fortalecer las acciones de vigilancia y monitoreo que se realizan en el país.

La tecnología geoespacial o geotecnología ha sido una herramienta útil en la detección de áreas afectadas por HLB o por *D. citri*, particularmente en la generación de modelos predictivos y reconocimiento espectral a partir de imágenes satelitales (Richard et al., 2018). Estudios desarrollados por García-Ruiz et al. (2013) y Pourreza et al. (2015) indicaron que el uso de estas metodologías fortalece la localización y el monitoreo de áreas de riesgo a HLB a partir de la detección rápida en proceso de exploración, y ayuda

a delimitar territorialmente la enfermedad, tanto en etapas asintomáticas como sintomáticas, que pueden ocurrir de forma extensiva (región) y con periodicidad constante. Por ejemplo, Sankaran et al. (2013) reportaron que con el uso de índices espectrales se pueden clasificar árboles infectados y asintomáticos con una precisión del 87 %. Por otro lado, Weng et al. (2018) hallaron que con sensores hiperespectrales se puede tener una precisión del 90 % en las clasificaciones de árboles con HLB. En general, los sensores, las imágenes satelitales y el procesamiento en sistemas de información geográfica son herramientas que permiten reconocer y localizar áreas con problemas fitosanitarios.

## **Materiales y métodos**

La estructura metodológica se basa en el concepto del triángulo epidemiológico para localizar áreas con riesgo potencial a HLB al determinar la correlación entre ambiente, plaga y hospedero (Scholthof, 2007). Cada una de estas variables está relacionada con el potencial de introducción, establecimiento y dispersión del patosistema HLB-*D. citri*, para lo cual se utilizaron métodos diferentes de espacialización que se describen a continuación.

### **Identificación espacial de los hospederos**

Para la identificación de los hospederos comerciales y rurales se obtuvieron datos de la Red de Información y Comunicación del Sector Agropecuario de Colombia (Agronet, 2017) y del Tercer Censo Nacional Agropecuario del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, 2014). Las estadísticas reportan la superficie sembrada de los hospederos de naranja, limón, mandarina, lima ácida Tahití y toronja, y fueron concentradas en una sola base de datos a nivel municipal. Dicha información se unió con un mapa vectorial (*shapefile*) a nivel municipal descargado del Geoportal del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2005). La cartografía de la superficie sembrada se representó por medio de colores por municipio; los colores cálidos (rojos) señalan los sitios con mayor superficie y los colores fríos, los sitios de menor superficie.

### **Caracterización de grados días de desarrollo mediante imágenes de satélite**

Se usó el modelo de grados días de desarrollo (GDD), conocido también como *unidades calor* o *unidades de desarrollo*, según el cual la velocidad de desarrollo de los insectos es proporcional a la temperatura de su ambiente y estos requieren cierta cantidad de calor para pasar de un punto a otro en su ciclo de vida (Damos, 2015; Pruess, 1983). Esta relación puede determinarse conociendo las temperaturas umbrales inferior y superior entre las cuales se desarrolla la especie, y el número de unidades de calor necesarias para completar su ciclo de vida (huevo-adulto, en caso de insectos) (Maiorano, 2012).

Para generar el modelo de GDD se descargaron imágenes satelitales de temperatura de la superficie terrestre (LST, por su sigla en inglés) diarias del portal Level-1 and Atmosphere Archive & Distribution System; Distributed Active Archive Center (LAADS DAAC) de la NASA, donde está alojado el conjunto de datos MOD11A1 MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1 km SIN Grid, V006 (Wan et al., 2015). Las imágenes fueron tomadas el 31 de diciembre de 2018 y el 31 de mayo de 2019, y se descargaron las del *subdataset* 0, que corresponden a LST diarias. La resolución espacial de dichas imágenes es de 1 km x 1 km y se encuentran divididas geográficamente en seis rejillas que cubren casi la totalidad

del territorio colombiano. Después, se realizó el escalamiento de los valores del pixel —que originalmente están en un rango de 7.500 a 65.535— mediante una calculadora ráster al multiplicar la imagen por el factor de escala, cuyo valor es 0,02. Esto dio como resultado el valor del pixel en unidades kelvin, que fueron luego convertidas a centígrados (Wan et al., 2015). Tras corregir radiométricamente la nubosidad de las imágenes procesadas, se les aplicó la siguiente fórmula:

$$GDD = \frac{T_{min} + T_{max}}{2} - UI$$

Donde  $T_{min}$ : temperatura mínima;  $T_{max}$ : temperatura máxima y  $UI$ : umbral inferior de temperatura (Arnold, 1960; Snyder, 1985). Para *D. citri* se usaron los datos obtenidos por Nava et al. (2007), quienes reportaron un umbral inferior de 10,45 °C y máximo de 35 °C, con un acumulado de grados días de 210,9 para la fase de huevo-adulto. Al final, se sumó el total de las imágenes descargadas por cada rejilla (31 imágenes para ambas fechas) y se aplicó una máscara para extraer solo valores de pixel de Colombia.

### Modelo de distribución potencial

Con los sitios de presencia de *D. citri* y las variables bioclimáticas se obtuvo un modelo de distribución potencial mediante el *software* Maxent. Este programa utiliza un método de inteligencia artificial que aplica el principio de máxima entropía para calcular la distribución geográfica más probable de una especie usando como datos solo los sitios de presencia y las variables bioclimáticas asociadas a estos (Phillips et al., 2006). Para ello, se empleó la información sobre presencia de *D. citri* en Colombia registrada en el sitio web de la Global Biodiversity Information Facility (GBIF, 2019) y los reportes de Ángel et al. (2014), Moncayo-Donoso et al. (2014), King (2012) e ICA (2010). En total, se obtuvieron 398 registros de presencia de *D. citri*, organizados por longitud y latitud y preparados en una base de datos delimitada por comas (CSV) para la incorporación al *software*. Como variables bioclimáticas se usaron las capas mundiales de WorldClim, que corresponden a 19 variables climáticas (tabla 1) en formato ráster y con resolución de 1 km x 1 km (Fick & Hijmans, 2017; Hijmans et al., 2005).

**Tabla 1.** Variables bioclimáticas usadas para la generación del modelo de distribución potencial de *D. citri*

Clave	Variable bioclimática	Clave	Variable bioclimática
BIO1	Temperatura promedio anual	BIO11	Temperatura promedio del trimestre más frío
BIO2	Oscilación diurna de la temperatura	BIO12	Precipitación anual
BIO3	Isotermalidad	BIO13	Precipitación del periodo más lluvioso
BIO4	Estacionalidad de la temperatura	BIO14	Precipitación del periodo más seco
BIO5	Temperatura máxima promedio del periodo más cálido	BIO15	Estacionalidad de la precipitación
BIO6	Temperatura mínima promedio del periodo más frío	BIO16	Precipitación del trimestre más lluvioso
BIO7	Oscilación anual de la temperatura	BIO17	Precipitación del trimestre más seco
BIO8	Temperatura promedio del trimestre más lluvioso	BIO18	Precipitación del trimestre más cálido
BIO9	Temperatura promedio del trimestre más seco	BIO19	Precipitación del trimestre más frío
BIO10	Temperatura promedio del trimestre más cálido		

Fuente: Hijmans et al. (2005)

Al momento de correr el modelo, se consideró el 80 % de los datos para el entrenamiento y el 20 % restante para medir la capacidad predictiva (test); además, se obtuvo una salida del modelo tipo logística con probabilidades de presencia previstas entre el rango binario (Phillips et al., 2006; Tang et al., 2019). El resultado del modelo expresa el valor de la idoneidad del hábitat para *D. citri* como una función de las variables ambientales por medio de una prueba estadística de validación denominada *área bajo la curva* (AUC, por su sigla en inglés). Esta prueba indica la sensibilidad, entendida como la probabilidad de obtener un resultado de presencia cuando la especie está presente; mientras más cercana esté al valor 1, más confiable será el resultado (Phillips et al., 2006). Adicionalmente, el *software* calcula a partir de iteraciones el porcentaje de contribución al modelo de cada una de las variables bioclimáticas usadas para su creación. Este análisis marca la similitud climática que hay entre los sitios habitados por *D. citri* y que representan un riesgo por la probabilidad de dispersión.

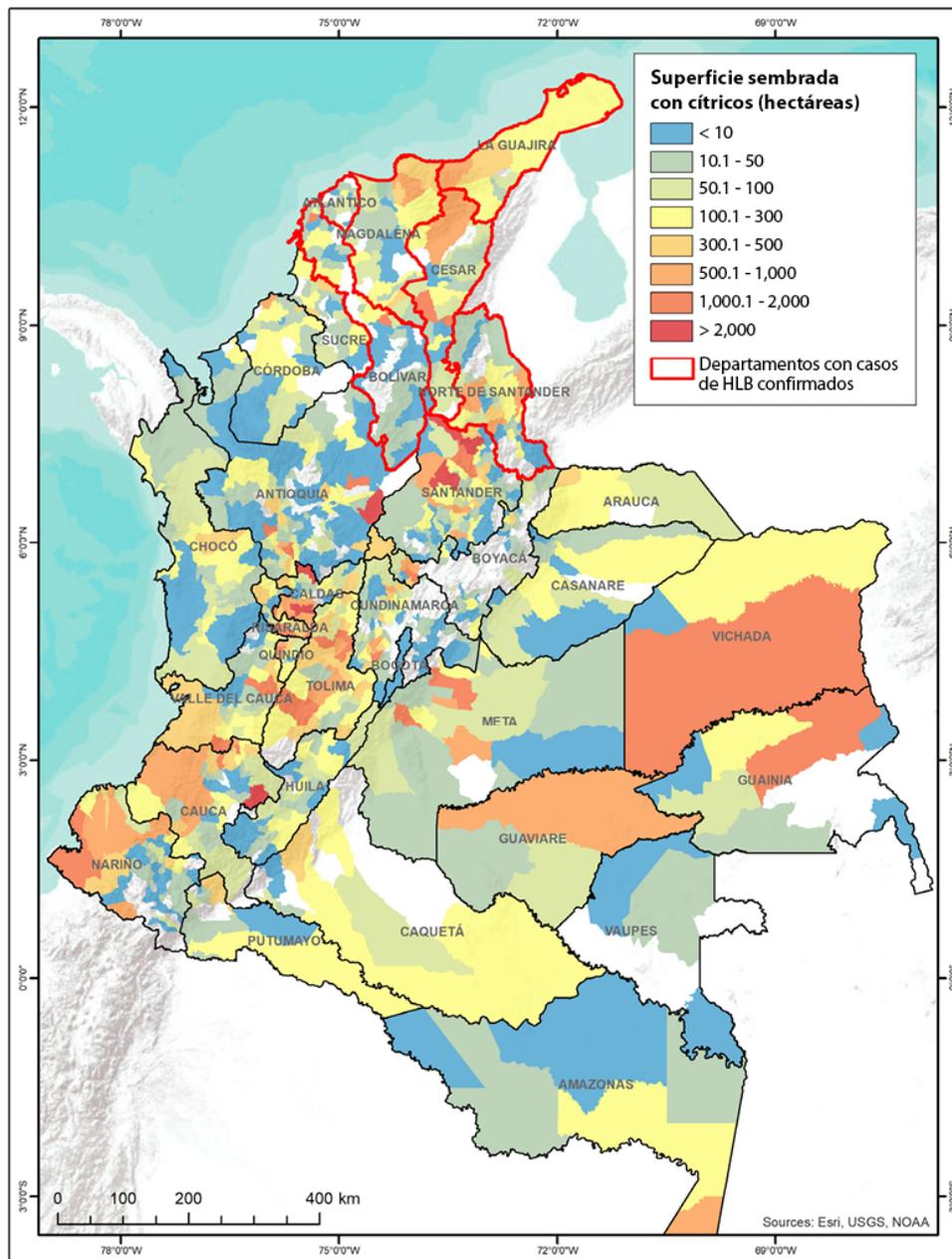
### Identificación de áreas en riesgo

Para la definición de las áreas de riesgo a HLB en Colombia, se usó el resultado de los procedimientos previamente descritos (Scholthof, 2007): grados días de desarrollo (plaga), superficie sembrada con cítricos (hospedero) y modelo de distribución potencial (ambiente). Cada capa fue homologada a valores entre 0 y 1, donde 1 representaba el valor máximo obtenido según su temática y los números cercanos a 0, el valor mínimo. Posteriormente, se realizó un análisis multicriterio en el sistema de información geográfica QGIS, en el que se asignó el mismo peso a cada una de las tres variables obtenidas. El mapa de riesgo tiene como fin ubicar los sitios potenciales para la presencia del patosistema HLB-*D. citri* y reconocer la intensidad probabilística de daño. Las escalas de riesgo fueron agrupadas en valores de 0 a 1, donde los valores cercanos a 1 indican el mayor riesgo y se identifican con colores cálidos (rojo), y los valores cercanos a 0 indican menor riesgo y se representan con colores fríos (azul).

## Resultados y discusión

Como se observa en la figura 1, las áreas citrícolas se siembran en todas las regiones naturales de Colombia. Según el Tercer Censo Nacional Agropecuario de 2014, Colombia tiene sembradas con cultivos de cítricos poco más de 160.000 ha, distribuidas en 885 municipios de 33 departamentos (DANE, 2014). En la región Andina y Caribe se observa una mayor densidad y superficie de plantas hospedantes. Los cítricos predominantes son naranja, limón, mandarina, lima ácida Tahití y toronja.

Las detecciones previas de HLB se han descrito en seis departamentos al norte de Colombia, que concentran el 11,2 % de los cítricos comerciales del país (DANE, 2014); es decir, son vulnerables a la enfermedad cerca de 11.000 ha. Sin embargo, por proximidad a las áreas con HLB, el departamento de Santander, que posee mayor superficie sembrada de cítricos comerciales (>20.000 ha), presenta una alta vulnerabilidad a HLB y a *D. citri* infectivos. Además, puede conectar geográficamente las áreas cuarentenarias y las áreas libres del centro y el occidente del país. Asimismo, la distribución casi total de cítricos en el país incrementa el riesgo de dispersión y establecimiento de la enfermedad o de *D. citri*, tanto por la movilización de material vegetal infectivo como por la dispersión activa o pasiva de psílidos infectados (Araque & Arévalo, 2018; Galindo, 2014).

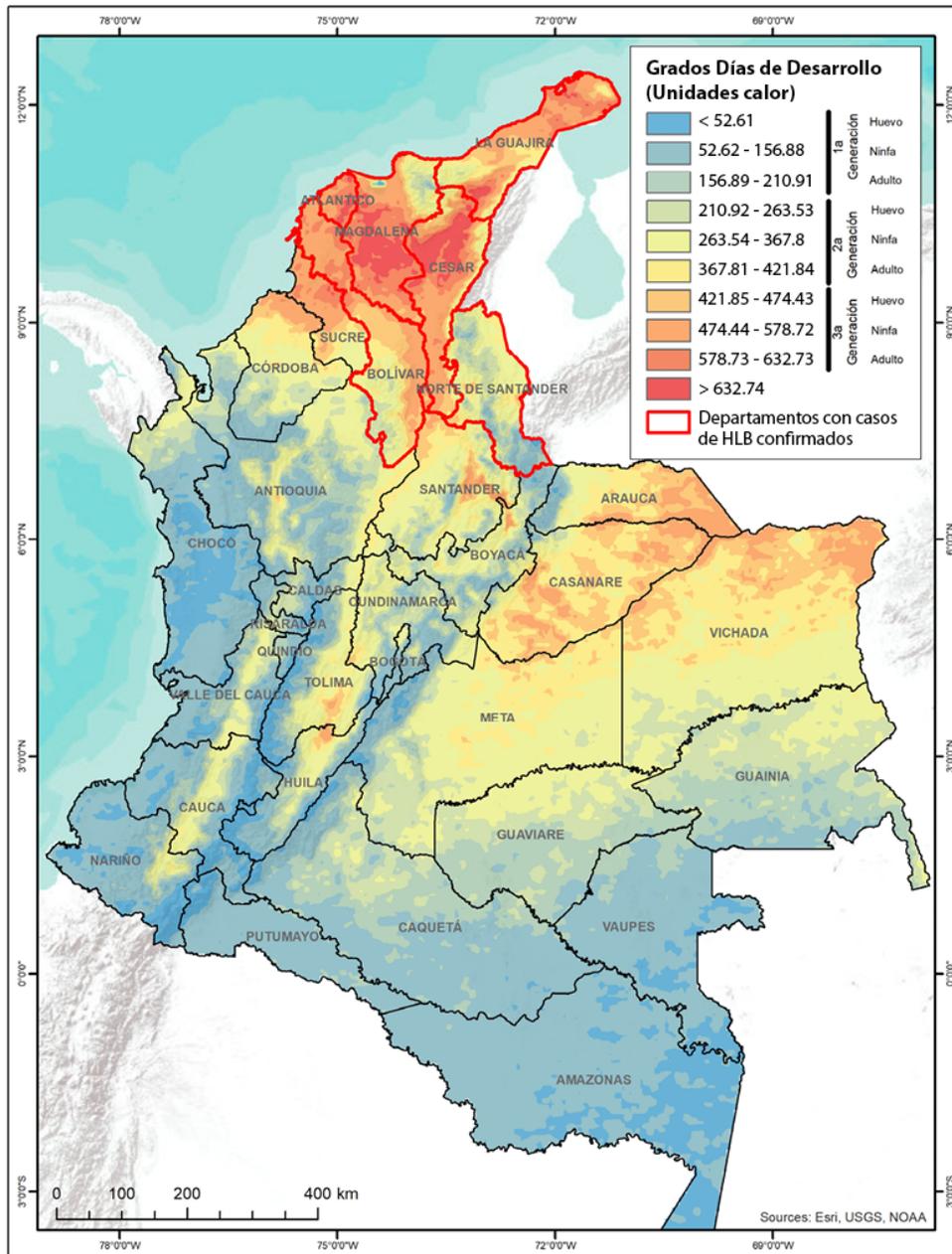


**Figura 1.** Ubicación de las regiones cítricas en Colombia. La escala de colores señala el área plantada y las líneas rojas enmarcan las zonas donde previamente se ha informado la detección de la bacteria asociada a HLB.

Fuente: Elaboración propia con base en DANE (2014)

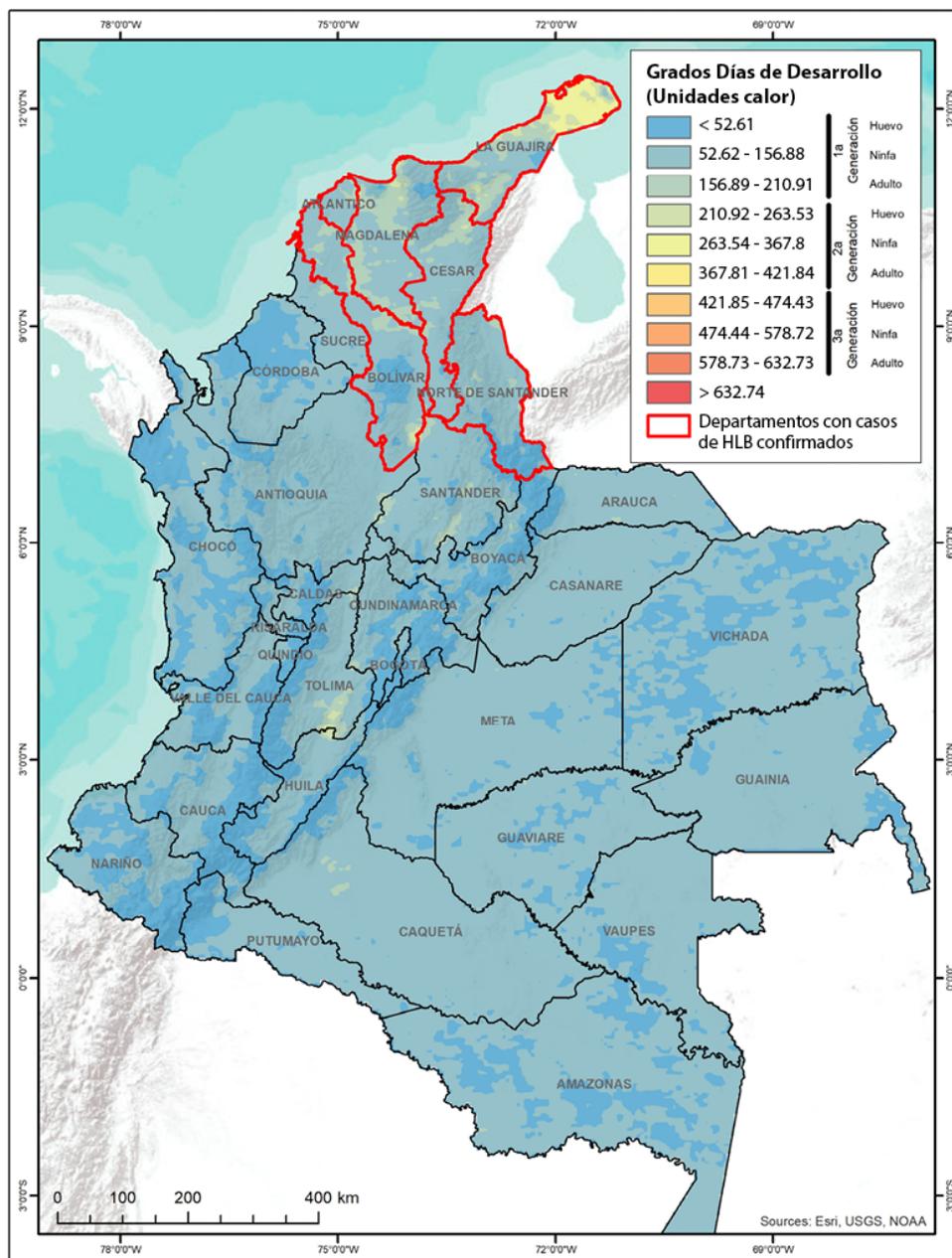
Los modelos de grados días de desarrollo se realizaron para los meses de diciembre de 2018 y mayo de 2019. A pesar de existir poca oscilación térmica en el país por su cercanía a la línea ecuatorial, estos meses son los que más contraste tienen en los rangos promedio de temperatura media (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2017). En ambos se identificaron los sitios con temperaturas superiores al umbral inferior de desarrollo en 24 horas, que para *D. citri* fue de 10,45 °C (Nava et al., 2007), con la acumulación de los 31 días para las dos fechas.

En la figura 2 se observa el modelo de GDD para el mes de diciembre, el cual indica que en gran parte del país existen las condiciones climáticas favorables para el desarrollo de al menos una generación de *D. citri*. En la zona norte (región Caribe), donde actualmente se reporta la presencia de la enfermedad, la temperatura resultó favorable con más de 600 unidades calor, lo que representó el posible desarrollo de tres o más generaciones (ciclo de vida huevo-adulto) del psílido durante el transcurso de ese mes. En las regiones Andina y Orinoquia, las condiciones climáticas encontradas pueden favorecer al desarrollo de dos a tres generaciones, específicamente en los departamentos de Antioquia, Arauca, Casanare, Santander, Tolima y Vichada. En el mes de mayo, la temperatura favorable para *D. citri* solo ocurrió al norte de La Guajira y en algunas pequeñas áreas de los departamentos de Bolívar, Cesar, Magdalena y Tolima (figura 3). Sin embargo, las condiciones para el desarrollo del psílido se presentaron en la mayor parte del país, aunque las unidades calor acumuladas del mes fueron inferiores a las registradas en diciembre. Estos datos coinciden con los presentados por Botero et al. (2011), quienes indican que entre los meses de noviembre a enero, en los departamentos de Cundinamarca, Santander y Tolima existe un mayor número de individuos en los estadios de huevos y ninfas de *D. citri* en *C. latifolia* y *C. sinensis*; de igual forma, para hospederos ornamentales (*S. glutinosa*) en Cundinamarca y Tolima hubo mayor número de individuos en las fluctuaciones poblacionales de *D. citri* durante estos meses.



**Figura 2.** Modelo de grados días de desarrollo de *D. citri* para todo el territorio colombiano, diciembre de 2018. La escala de colores representa la cantidad de GDD y las líneas rojas enmarcan las zonas donde previamente se ha informado la detección de la bacteria asociada a HLB.

Fuente: Elaboración propia con base en Wan et al. (2015) y Nava et al. (2007)



**Figura 3.** Modelo de grados días de desarrollo de *D. citri* para todo el territorio colombiano, mayo de 2019. La escala de colores representa la cantidad de GDD y las líneas rojas enmarcan las zonas donde previamente se ha informado la detección de la bacteria asociada a HLB.

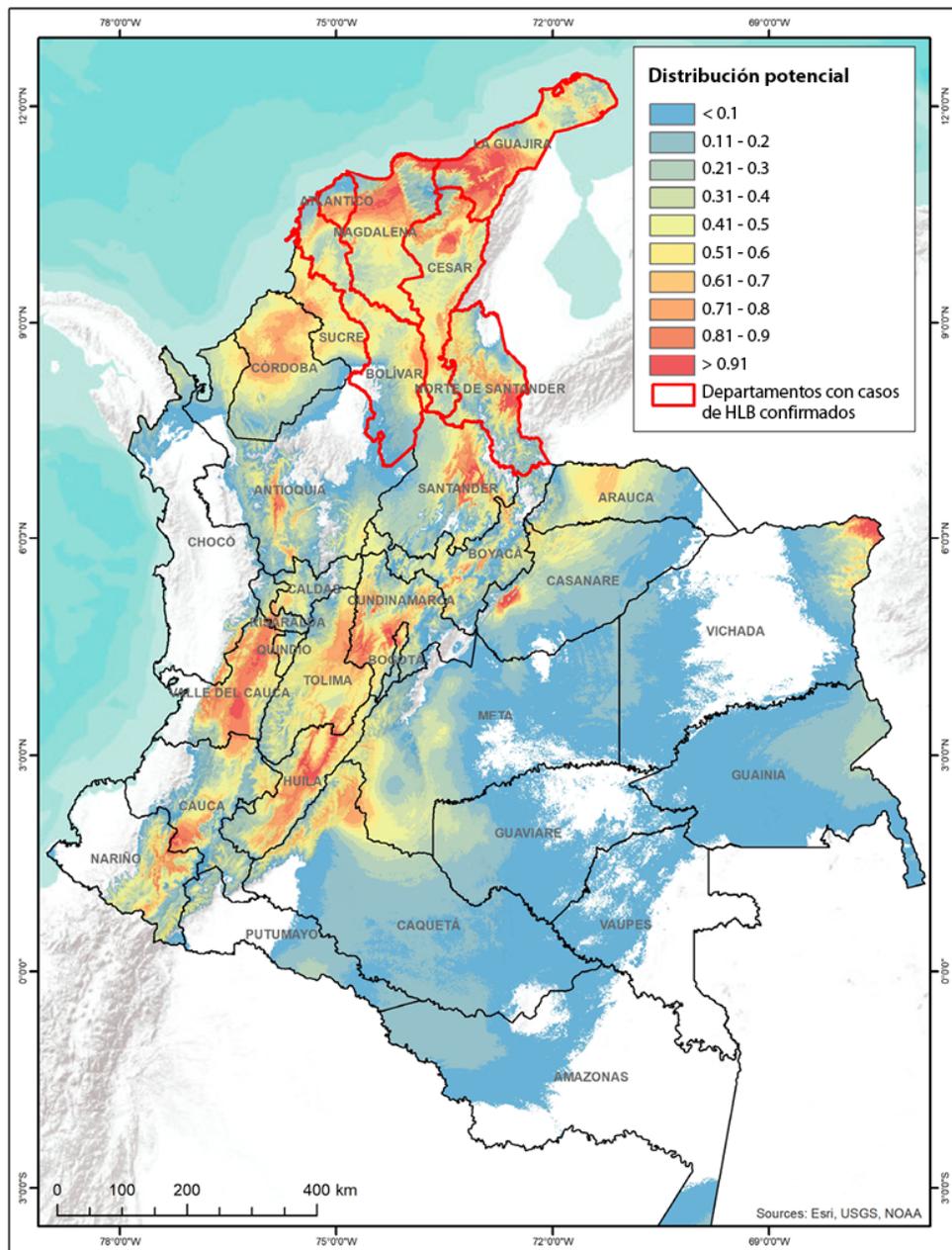
Fuente: Elaboración propia con base en Wan et al. (2015) y Nava et al. (2007)

El modelo de distribución potencial de máxima entropía (Maxent) de *D. citri* (figura 4) se creó después de alcanzar las 5.000 iteraciones, lo que resultó en un AUC de 0,898 en los datos del modelo que, según Peterson et al. (2011) y Phillips et al. (2006), presenta una alta predicción dado que las curvas de sensibilidad y especificidad están cercanas a 1. Las variables que más contribuyeron a la generación del modelo fueron precipitación anual (39,4 %), isothermalidad (9,5 %), estacionalidad de la precipitación (6,9 %), precipitación del trimestre más húmedo (5,8 %), rango de temperatura diurna

media (5,8 %), rango anual de temperatura (5,4 %), temperatura máxima del mes más cálido (5,1 %) y temperatura mínima del mes más frío (5,1 %). La suma de estas variables explicó el 78 % del modelo y coincide con lo obtenido por Narouei-Khandan et al. (2016), en cuyo estudio las variables de precipitación anual, temperatura mínima del mes más frío y precipitación del trimestre más húmedo definieron la distribución del psílido y la enfermedad.

Se ha reportado que la precipitación puede ser una variable climática que disminuye drásticamente las densidades de huevo y ninfas (Botero et al., 2011; Hall et al., 2013); en el modelo, esta variable reduce la probabilidad de presencia de *D. citri* cuando la precipitación es mayor a 1.000 mm al año. La temperatura es otra variable de relevancia: el rango óptimo para el crecimiento de poblaciones de psílicos es entre 25 °C y 28 °C, y los umbrales en los que no se desarrolla son <10 °C y >33 °C (Liu & Tsai, 2000). En el modelo, la probabilidad de presencia de *D. citri* disminuye casi a cero cuando la temperatura máxima del mes más cálido es mayor que 34 °C y la temperatura mínima del mes más frío es menor que 10 °C, datos similares a los obtenidos por Wang et al. (2019). En cuanto a la isothermalidad, la probabilidad de presencia aumenta hasta un 60 % cuando las temperaturas están entre 26,6 °C y 32,7 °C (Liu & Tsai, 2000).

En la figura 4, los sitios con valores cercanos a 1 son aquellos que presentan mayor distribución potencial a *D. citri*; es decir, que tienen condiciones adecuadas para el establecimiento de la enfermedad. Las áreas con índices superiores a 0,8 corresponden a la región norte, donde actualmente se reporta el HLB. Sin embargo, departamentos como Santander, Cundinamarca, Tolima, Valle del Cauca, Huila (en la región Andina), Vichada y Casanare (en la región Orinoquia) presentan una alta distribución de psílicos.



**Figura 4.** Modelo de distribución potencial de *D. citri*.

Fuente: Elaboración propia con base en Hijmans et al. (2005), Ángel et al. (2014), Moncayo-Donoso et al. (2014), King (2012) e ICA (2010)

La figura 5 muestra las áreas de riesgo a HLB con base en la conjunción de las áreas con hospedantes, los grados días de desarrollo del vector y la distribución potencial para diciembre de 2018. Se puede notar que existen áreas en toda Colombia con riesgo alto y muy alto a la enfermedad de HLB. De forma extensiva y más homogénea en la región Caribe, los departamentos de Atlántico, Cesar, La Guajira y Magdalena tienen la mayor superficie con riesgo muy alto y la presencia confirmada de la enfermedad. En los departamentos de Bolívar y Norte de Santander, donde también se reporta HLB, existen áreas con riesgo muy alto. La región Andina, donde se produce cerca del 70 % de los cítricos en Colombia, presenta zonas con riesgo

muy alto como los municipios de Girón, Lebrija, Rionegro y San Vicente de Chucurí (Santander), donde en conjunto se siembra el 10 % de los cítricos comerciales (DANE, 2014). También existe riesgo en los departamentos de Caldas, Cauca, Cundinamarca, Huila y Valle del Cauca, en los que la comercialización de cítricos tiene relevancia económica. En el caso particular del departamento de Tolima, las áreas de riesgo a HLB coinciden con los hallazgos de Araque y Arévalo (2018), que muestran una alta dispersión potencial de *D. citri* debida a la cercanía de predios y viveros citrícolas con la carretera.

A partir de la generación de mapas de riesgo a la enfermedad se puede territorializar por departamento y municipio el tipo de riesgo que se presenta en cada uno de ellos. Este insumo constituye un esbozo sobre las posibles zonas vulnerables a HLB, que puede servir de referencia para la implementación de acciones que ayuden a controlar la enfermedad.

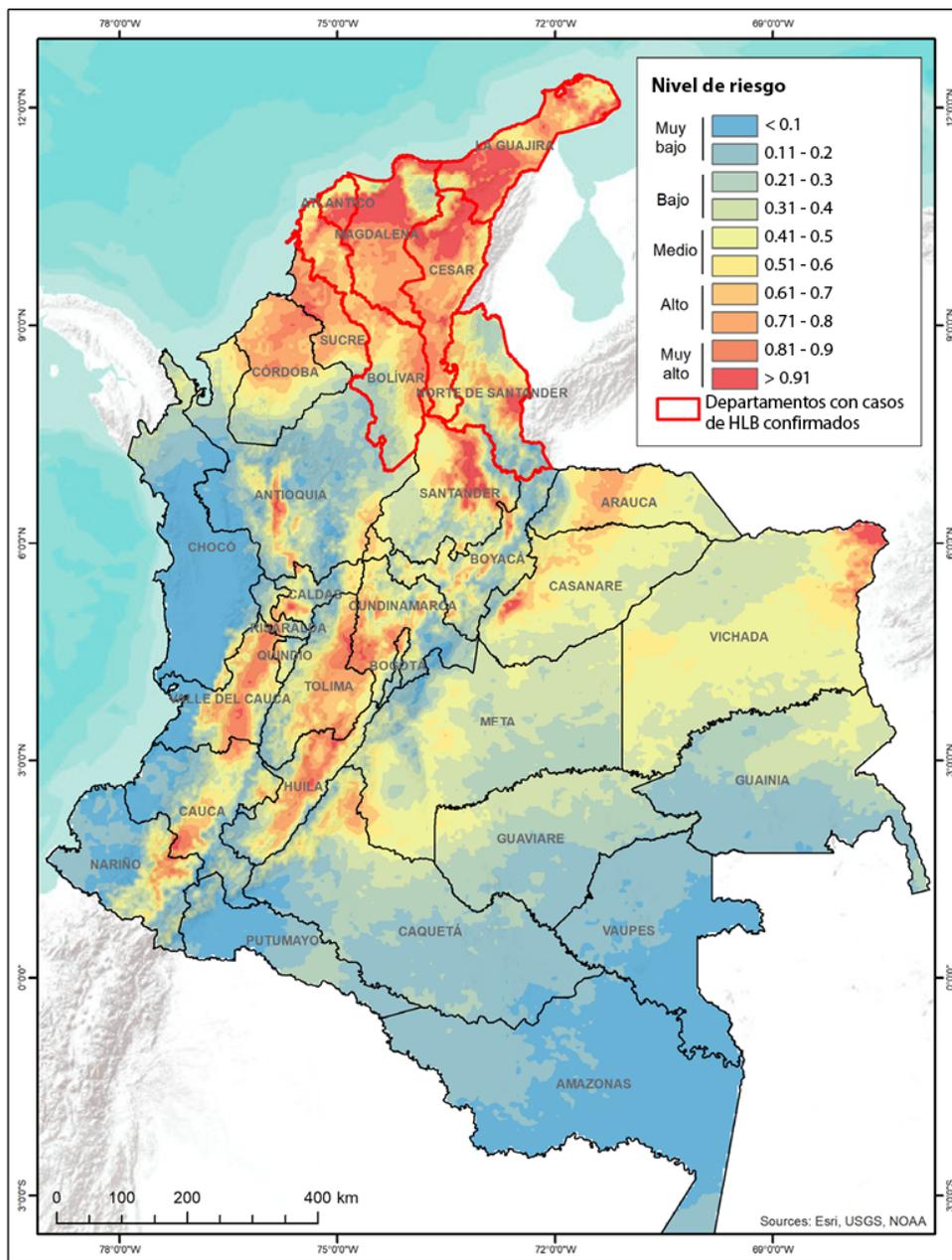
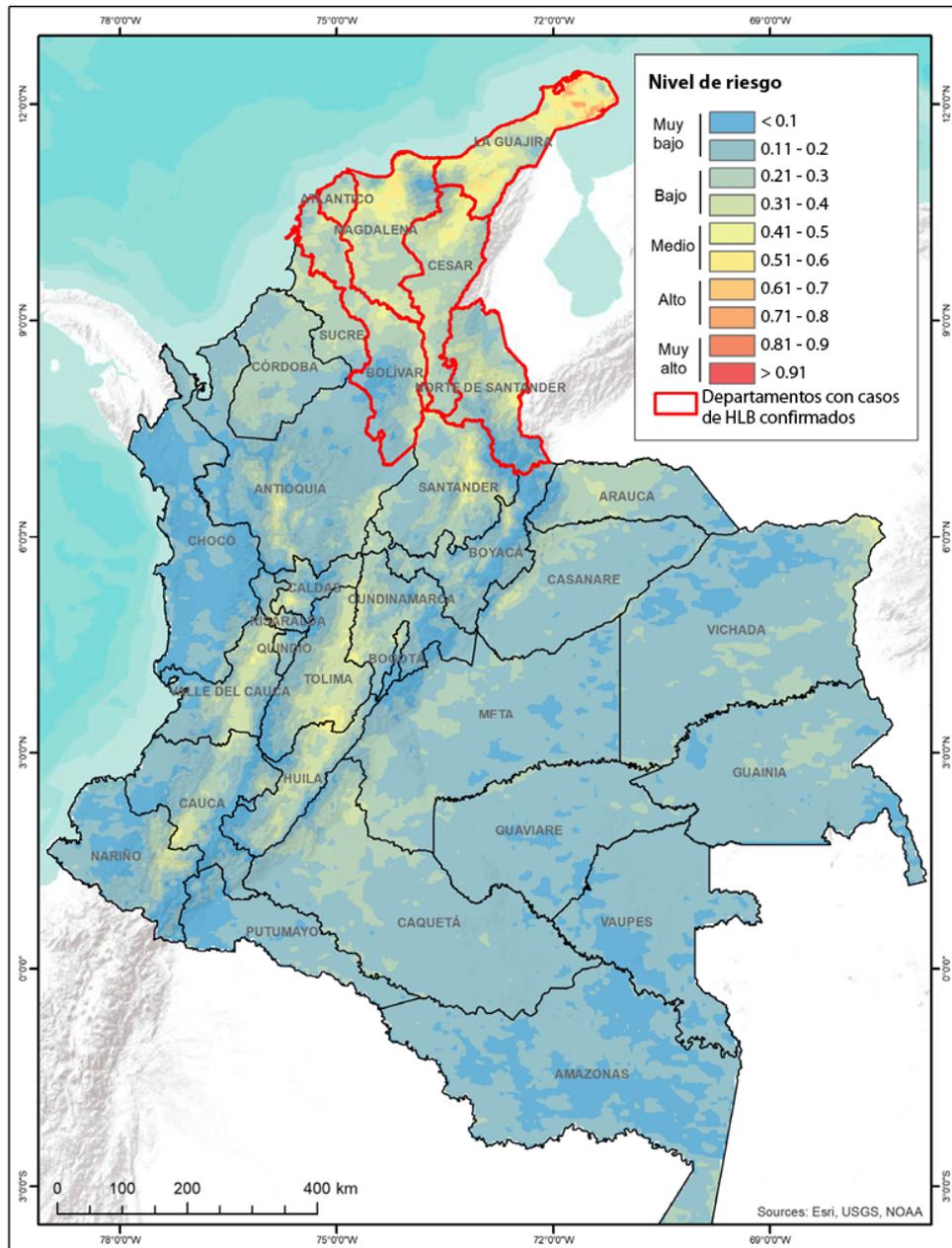


Figura 5. Mapa de riesgo a la dispersión de HLB en las regiones de Colombia, diciembre de 2018. Fuente: Elaboración propia

Según el presente estudio, las zonas citricolas de Colombia presentan áreas extensas con condiciones ambientales y climáticas óptimas para el desarrollo de la enfermedad. Esto implica que las más de 160.000 ha de cítricos de Colombia presentan un riesgo a HLB en un 5,1 % muy alto, 10,4 % alto, 19,1 % medio, 28,7 % bajo y 36,7 % muy bajo en las condiciones ambientales de diciembre de 2018. La situación cambia en el mes de mayo de 2019, a pesar de la cercanía del país con el eje ecuatorial y la reducida oscilación de temperatura. Para dicho mes, existe solo el 0,01 % de riesgo muy alto en el municipio de Uribia (La Guajira); 0,26 % de riesgo alto en pequeñas áreas de los departamentos de Huila, Magdalena y Tolima; 3,9 % de riesgo medio en la región Caribe y la región Andina (centro y sur); 35 % de riesgo bajo y 60,4 %

de riesgo muy bajo en el resto del país (figura 6). Estos datos corresponden a los informes de Botero et al. (2011), según los cuales en la mayor parte de los departamentos de Caldas, Cundinamarca, Meta y Santander, para *Citrus latifolia* y *C. sinensis*, y en el departamento de Córdoba, para *S. glutinosa*, se reduce la producción de huevos, ninfas y adultos a partir del segundo trimestre del año.



**Figura 6.** Mapa de riesgo a la dispersión de HLB en las regiones de Colombia, mayo de 2019.

Fuente: Elaboración propia

Esta diferencia en el nivel de riesgo potencial entre los meses de diciembre de 2018 y mayo de 2019 puede estar definida por la variable dinámica de grados días de desarrollo, ya que el calor acumulado por el número de días reportado en cada una de las imágenes corresponde a las temperaturas captadas por el sensor (MODIS/Terra). En el caso de las variables de hospedantes y distribución potencial, su

dinamismo en la información estará proporcionada por la capacidad de actualizar datos de presencia (*D. citri*) y superficie sembrada con cítricos. De igual manera, debe tenerse en cuenta la resolución espacial de las variables ambientales y de los insumos satelitales usados para la generación del modelo de riesgo, así como los registros de ocurrencia de la enfermedad (Narouei-Khandan et al., 2016), ya que la superficie real representada por el modelo (1 km × 1 km) sugiere diferencias en una escala más local, donde otros factores como variedad, edad de la planta, prácticas de manejo, entre otros, deberán considerarse si se requiere un modelo de riesgo más preciso (Udell et al., 2017).

La incorporación de otro tipo de datos como densidad de cultivos y cercanía de predios citrícolas a carreteras o viveros puede mejorar el modelo de riesgo, ya que existen variables relevantes como el transporte de material infectivo y la siembra de plantas no certificadas, que, según se ha demostrado, pueden tener fuertes implicaciones en la dispersión de la enfermedad (Araque & Arévalo, 2018; King, 2012). Esto concuerda con los estudios de Thomas et al. (2017) y Galindo (2014), en los que las detecciones de *D. citri* y material vegetal infectivo se reportan en la cercanía a carreteras principales, que pueden ser una vía importante de introducción y propagación de la enfermedad. Las áreas de riesgo presentes en Colombia y los hospederos comerciales con mayor densidad se encuentran sobre dos principales vías (carreteras federales 45 y 55) que discurren desde el norte (donde se presenta HLB) hasta las áreas libres del centro y el occidente del país.

## Conclusiones

El presente trabajo propone una alternativa para fortalecer el monitoreo y la vigilancia de HLB y *Diaphorina citri* mediante el uso de tecnología geoespacial para localizar áreas de riesgo potencial con base en la ubicación de plantas hospederas, grados días de desarrollo y distribución potencial. La propuesta metodológica se basa en el concepto de triángulo epidemiológico (Scholthof, 2007) según la correlación entre ambiente, plaga y hospedero, y se presenta como una opción para el seguimiento de la enfermedad a escala regional. Además, es un procedimiento automatizable, brinda resultados inmediatos, tiene una dinámica espacio-temporal alta, puede desarrollarse en *software* libre y con imágenes satelitales gratuitas y emplea información disponible en bases de datos nacionales e internacionales.

Las áreas de contingencia (seis departamentos del norte de Colombia) donde se han detectado 333 casos positivos (ICA, 2018) pueden considerarse como un foco de infección importante para el resto de las áreas citrícolas del país, ya que cerca de 11.000 ha se encuentran vulnerables a la enfermedad. Las regiones Andina y Orinoquia están libres de la enfermedad, aunque el monitoreo, la vigilancia y el control de HLB debe ser constante, ya que si la enfermedad se dispersa y se establece, podría generar daños económicos y ambientales a más de 100.000 ha de cítricos de la zona.

Las condiciones ambientales en Colombia son óptimas para la enfermedad; la ubicación geográfica del país y el tipo de paisaje generan temperaturas adecuadas para el desarrollo de un número importante de generaciones de *D. citri*. La distribución potencial de *D. citri* y HLB se extiende a la mayor parte de las zonas citrícolas de Colombia; variables bioclimáticas como precipitación anual, temperatura mínima del mes más frío y precipitación del trimestre más húmedo definen la distribución de la enfermedad.

La tecnología, en especial la geoespacial, debe ser usada en la detección de áreas en riesgo y su delimitación territorial, ya que fortalecería las acciones de monitoreo y los procesos de diagnóstico, los cuales podrían llevarse a cabo de manera regional o local y con una alta dinámica temporal. En combinación con la experiencia lograda en otros países, esta tecnología puede ayudar a que Colombia restrinja y controle una de las enfermedades más dañinas de los cítricos en la actualidad.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Sr. Oscar Perea de la Asociación de Citricultores de Caldas (CitriCaldas) y a la Dra. Nubia Murcia Riaño de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia) por la invitación al foro “Experiencias en el diseño de una plataforma de vigilancia epidemiológica mediante el uso de sensores remotos para el manejo del HLB y el PAC”, de donde surgió la idea de este artículo. Al Laboratorio Nacional de Geoprosesamiento de Información Fitosanitaria (LaNGIF) de México, donde se gestó parte de este estudio, y, por último, a los pares evaluadores y a los editores de esta revista por sus contribuciones para mejorar este trabajo.

## Descargos de responsabilidad

Todos los autores realizaron aportes significativos al documento, están de acuerdo con su publicación y manifiestan que no existen conflictos de interés en este estudio.

## Referencias

- Ángel, J., Hernández, E., Herrera, N., Gómez, L., Castro, Á., Sepúlveda, A., & Ebratt, E. (2014). Citrus huanglongbing: validation of real-time PCR (qPCR) for the detection of *Candidatus Liberibacter asiaticus* and *Candidatus Liberibacter americanus* in Colombia. *Agronomía Colombiana*, 32(3), 377-389. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v32n3.44069>
- Araque, W., & Arévalo, E. (2018). Potencial distribución espacial del vector del HLB de los cítricos *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae) en el departamento de Tolima, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 12(3), 545-560. <https://doi.org/10.17584/rcch.2018v12i3.9521>
- Arnold, C. (1960). Maximum-minimum temperatures as a basis for computing heat units. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science, Boston*, 76(1), 682-692. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19610305608>
- Beattie, G., Holford, P., Mabblerley, D., Haigh, A., & Broadbent, P. (2008). On the origins of *Citrus*, Huanglongbing, *Diaphorina citri* and *Trioza erytreae*. In T. R. Gottwald & J. H. Graham (Eds.), *Proceedings of the 2008 International Research Conference on Huanglongbing. APS Crop Protection and Management Collection* (pp. 25-57). Plant Management Network. <https://www.plantmanagementnetwork.org/proceedings/irchlb/2008/presentations/IRCHLB.K.2.pdf>
- Botero, V., Ochoa, A., Zamora, J., Ortiz, A., Fuel, S., Florez, E., Mejía, L., Guarín, J., Orduz-Rodríguez, J., Chaparro-Zambrano, H., & Arévalo, E. (2011). *Diaphorina citri*. Identificación de la dinámica poblacional de *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae) en los cultivos de cítricos de Colombia: una herramienta para implementar un sistema piloto de seguimiento de poblaciones del insecto vector del HLB. Universidad Nacional de Colombia. <https://doi.org/10.13140/2.1.5056.6087>

- Bové, J. (2006). Huanglongbing: a destructive, newly-emerging, century-old disease of citrus. *Journal of Plant Pathology*, 88(1), 7-37. <https://doi.org/10.4454/jpp.v88i1.828>
- Centre for Agricultural Bioscience International. (2020, abril 1). *Diaphorina citri (Asian citrus psyllid)*. CABI International. <https://www.cabi.org/isc/datasheet/18615>
- Centre for Agricultural Bioscience International, & European and Mediterranean Plant Protection Organization. (2017). *Candidatus Liberibacter asiaticus*. [Distribution map]. En *Distribution Maps of Plant Diseases*, (N.º April) Map 766 (Edition 4). CABI. <https://www.cabi.org/isc/abstract/20173134805>
- Da Graça, J. (2008, May 7-8). *Biology, history and world status of Huanglongbing* [Conference session]. In I Taller Internacional sobre *Huanglongbing* de los cítricos (*Candidatus Liberibacter* spp.) y el psílido asiático de los cítricos (*Diaphorina citri*). Hermosillo, México. <https://pdfs.semanticscholar.org/8972/91fdd24315963fbf532d3af3d3aa7663a3b5.pdf>
- Da Graça, J., Douhan, G., Halbert, S., Keremane, M., Lee, R., Vidalakis, G., & Zhao, H. (2016). Huanglongbing: an overview of a complex pathosystem ravaging the world's citrus. *Journal of Integrative Plant Biology*, 58(4), 373-387. <https://doi.org/10.1111/jipb.12437>
- Da Graça J., Kunta, M., Sétamou, M., Rascoe, J., Li, W., Nakhla, M., Salas, B., & Bartels, D. (2015). Huanglongbing in Texas: report on the first detections in commercial citrus. *Journal of Citrus Pathology*, 2, 1-6. <https://escholarship.org/uc/item/99p100ts>
- Damos, P. (2015). Modular structure of web-based decision support systems for integrated pest management. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(4), 1347-1372. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0319-9>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2014). *Censo Nacional Agropecuario 2014*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/censo-nacional-agropecuario-2014>
- Do Carmo Teixeira, D., Luc Danet, J., Eveillard, S., Cristina Martins, E., De Jesus Junior, W., Takao Yamamoto, P., Aparecido Lopes, S., Beozzo Bassanezi, R., Juliano Ayres, A., Saillard, C., & Bové, J. (2005). Citrus Huanglongbing in São Paulo State, Brazil: PCR detection of the 'Candidatus' *Liberibacter* species associated with the disease. *Molecular and Cellular Probes*, 19(3), 173-179. <https://doi.org/10.1016/j.mcp.2004.11.002>
- Ebratt, E., Rubio, L., Costa, V., Zambrano, E., Castro, A., & Santamaría, M. (2011). Primer registro de *Tamarixia radiata* (Waterston, 1922) (Hymenoptera: Eulophidae) en Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 64(2), 6141-6146. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/29378/29618>
- European and Mediterranean Plant Protection Organization. (2020a, April 2). *EPPO Global Database. Diaphorina citri (DIAACI). Distribution*. <https://gd.eppo.int/taxon/DIAACI/distribution>
- European and Mediterranean Plant Protection Organization. (2020b, April 27). *EPPO Global Database. Candidatus Liberibacter asiaticus (LIBEAS). Distribution*. <https://gd.eppo.int/taxon/LIBEAS/distribution>
- Fick, S., & Hijmans, R. (2017). WorldClim 2: new 1- km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302-4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Galindo, M. (2014). Capítulo II. Introducción-dispersión de *Diaphorina citri* Kuwayama, vector del HLB: una construcción metodológica al protocolo de especies invasoras en la agricultura mexicana. En M. Galindo, & C. Contreras (Eds.), *Huanglongbing y psílido asiático de los cítricos: un acercamiento metodológico multidisciplinario. Colección Sanidad Vegetal. Tomo 2* (pp. 41-77). Universidad Autónoma de San Luis Potosí. <https://bit.ly/2SSgGMc>
- García-Ruiz, F., Sankaran, S., Maja, J., Lee, W., Rasmussen, J., & Ehsani, R. (2013). Comparison of two aerial imaging platforms for identification of Huanglongbing-infected citrus trees. *Computers and Electronics in Agriculture*, 91, 106-115. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.12.002>
- Global Biodiversity Information Facility. (2019). *Diaphorina citri Kuwayama, 1908*. GBIF Backbone Taxonomy. <https://www.gbif.org/species/2013312>

- Hall, D., Richardson, M., Ammar, E., & Halbert, S. (2013). Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri*, vector of citrus huanglongbing disease. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 146(2), 207-223. <https://doi.org/10.1111/eea.12025>
- Hijmans, R., Cameron, S., Parra, L., Jones, P., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965-1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>
- Instituto Colombiano Agropecuario. (2010). Situación actual del HLB y su vector el psílido asiático de los cítricos en Colombia. *Boletín Epidemiológico*. <https://bit.ly/2WIXPsH>
- Instituto Colombiano Agropecuario. (2014). Vigilancia del huanglongbing (HLB) de los cítricos y su vector el psílido asiático de los cítricos *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae) en Colombia. *Boletín Epidemiológico*, 4. <https://bit.ly/3fB0fgS>
- Instituto Colombiano Agropecuario. (2018). *Informe de gestión semestre I-2018*. <https://bit.ly/2WjTBEB>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2005). *Datos abiertos Subdirección Cartografía y Geografía. Cartografía básica. Cartografía base escala 1:500.000*. Geportal. <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-cartografia-y-geografia>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2017, August 16). *Promedios precipitación y temperatura media. Promedio de los años 1981-2010*. Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. <https://www.datos.gov.co/Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible/Promedios-Precipitacion-y-Temperatura-media-Promed/nrxu-h2dh>
- Jagoueix, S., Bove, J., & Garnier, M. (1994). The phloem-limited bacterium of greening disease of citrus is a member of the alpha subdivision of the Proteobacteria. *International Journal of Systematic Bacteriology*, 44(3), 379-386. <https://doi.org/10.1099/00207713-44-3-379>
- King, C. (2012). Dispersión de *Diaphorina citri* (Hemiptera: Psyllidae) en el departamento de Tolima (Colombia). *Revista Tumbaga*, 2(7), 51-60. <http://revistas.ut.edu.co/index.php/tumbaga/article/view/37>
- Kondo, T., Quintero, E. M., Campuzano, M., Wyckhuys, K.A.G., & Heraty, J. (2012). First report of *Tamarixia radiata* (Waterston) (Hymenoptera: Eulophidae), a parasitoid of the Asian citrus psyllid *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Psyllidae) in the department of Valle del Cauca, Colombia. *Boletín del Museo de Entomología de la Universidad del Valle*, 13(1), 48-51. <https://bit.ly/3cjMOzW>
- Liu, Y., & Tsai, J. (2000). Effects of temperature on biology and life table parameters of the Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri* Kuwayama (Homoptera: Psyllidae). *Annals of Applied Biology*, 137(3), 201-206. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2000.tb00060.x>
- Maiorano, A. (2012). A physiologically based approach for degree-day calculation in pest phenology models: The case of the European corn borer (*Ostrinia nubilalis* Hbn.) in northern Italy. *International Journal of Biometeorology*, 56, 653-659. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0464-z>
- Moncayo-Donoso, M., Almanza-Pinzón, M., Caicedo-Vallejo, A., Muñoz-Flórez, J., Montoya-Lerma, J., & Carabalí-Muñoz, A. (2014). Diversidad genética de *Diaphorina citri* en cultivos cítricos del Valle del Cauca y Quindío (Colombia). *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 12(2), 106-114. <https://bit.ly/2WLAXMs>
- Narouei-Khandan, H., Halbert, S., Worner, S., & Van Bruggen, A. (2016). Global climate suitability of citrus huanglongbing and its vector, the Asian citrus psyllid, using two correlative species distribution modeling approaches, with emphasis on the USA. *European Journal of Plant Pathology*, 144, 655-670. <https://doi.org/10.1007/s10658-015-0804-7>
- Nava, D., Torres, M., Rodrigues, M., Bento, J., & Parra, J. (2007). Biology of *Diaphorina citri* (Hem., Psyllidae) on different hosts and at different temperatures. *Journal of Applied Entomology*, 131(9-10), 709-715. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.2007.01230.x>

- Pérez-Artiles, L., Busoli, A., Sotelo, P., & Arcila, A. (2017). Biología y parámetros reproductivos de *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae) en diferentes hospederos de Rutaceae. *Revista Colombiana de Entomología*, 43(2), 141-150. <https://doi.org/10.25100/socolen.v43i2.5934>
- Peterson, A., Soberón, J., Pearson, R., Anderson, R., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M., & Araújo, M. (2011). *Ecological niches and geographic distributions (MPB-49)*. Princeton University Press. <https://doi.org/10.23943/princeton/9780691136868.001.0001>
- Phillips, S., Anderson, R., & Schapire, R. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3-4), 231-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Pourreza, A., Lee, W., Ehsani, R., Schueller, J., & Raveh, E. (2015). An optimum method for real-time in-field detection of Huanglongbing disease using a vision sensor. *Computer and Electronics in Agriculture*, 110, 221-232. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.11.021>
- Pruess, K. (1983). Day-degree methods for pest management. *Environmental Entomology*, 12(3), 613-619. <https://doi.org/10.1093/ee/12.3.613>
- Red de Información y Comunicación del Sector Agropecuario Colombiano. (2017). *Evaluaciones Agropecuarias Municipales. Cítricos*. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. [https://www.agronet.gov.co/Document/s/8-CÍTRICOS\\_2017.pdf](https://www.agronet.gov.co/Document/s/8-CÍTRICOS_2017.pdf)
- Resolución 1668 de 2019. “Por medio de la cual se declaran la enfermedad Huanglongbing (HLB) de los cítricos y su vector el insecto *Diaphorina Kuwayama*...”. Instituto Colombiano Agropecuario, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://bit.ly/2YPa44Y>
- Resolución 2390 de 2015. “Por medio de la cual se declara el estado de emergencia fitosanitaria en el territorio nacional por la presencia de adultos de *Diaphorina citri*...”. Instituto Colombiano Agropecuario. *Diario Oficial No. 49.723*. <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/col151548.pdf>
- Richard, R., Abdel-Rahman, E., Mohamed, S., Ekesi, S., Borgemeister, C., & Landmann, T. (2018). Importance of remotely-sensed vegetation variables for predicting the spatial distribution of African citrus trioza (*Trioza erytreae*) in Kenya. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(11), 1-19. <https://doi.org/10.3390/ijgi7110429>
- Sankaran, S., Maja, J., Buchanon, S., & Ehsani, R. (2013). Huanglongbing (citrus greening) detection using visible, near infrared and thermal imaging techniques. *Sensors*, 13(2), 2117-2130. <https://doi.org/10.3390/s130202117>
- Santivañez, T., Mora, G., Díaz, G., López, J., & Vernal, P. (2013). *Citrus. Marco estratégico para la gestión regional del Huanglongbing en América Latina y el Caribe*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://www.fao.org/3/a-i3319s.pdf>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, & Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. (2019). *Huanglongbing Candidatus Liberibacter spp. Ficha técnica No. 78*. [https://www.gob.mx/cms/upload/s/attachment/file/463426/78.\\_Ficha\\_t\\_cnica\\_Huanglongbing.\\_Mayo\\_2019..pdf](https://www.gob.mx/cms/upload/s/attachment/file/463426/78._Ficha_t_cnica_Huanglongbing._Mayo_2019..pdf)
- Scholthof, G. (2007). The disease triangle: pathogens, the environment and society. *Nature Reviews Microbiology*, 5, 152-156. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1596>
- Snyder, R. (1985). Hand calculating degree days. *Agriculture and Forest Meteorology*, 35(1-4), 353-358. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(85\)90095-4](https://doi.org/10.1016/0168-1923(85)90095-4)
- Tang, J., Li, J., Lu, H., Lu, F., & Lu, B. (2019). Potential distribution of an invasive pest, *Euplatypus parallelus*, in China as predicted by maxent. *Pest Management Science*, 75(6), 1630-1637. <https://doi.org/10.1002/ps.5280>
- Thomas, S., Simmons, G., & Daugherty, M. (2017). Spatiotemporal distribution of an invasive insect in an urban landscape: introduction, establishment and impact. *Landscape Ecology*, 32(10), 2041-2057. <https://doi.org/10.1007/s10980-017-0565-0>

- Udell, B., Monzo, C., Paris, T., Allan, S., & Stansly, P. (2017). Influence of limiting and regulating factors on populations of Asian citrus psyllid and the risk of insect and disease outbreaks. *Annals of Applied Biology*, 171(1), 70-88. <https://doi.org/10.1111/aab.12349>
- Wan, Z., Hook, S., & Hulley, G. (2015). MOD11A1 MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1 km SIN Grid V006 [Data set]. *NASA EOSDIS Land Processes DAAC*. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD11A1.006>
- Wang, R., Yang, H., Luo, W., Wang, M., Lu, X., Huang, T., Zhao, J., & Li, Q. (2019). Predicting the potential distribution of the Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri* (Kuwayama), in China using the MaxEnt model. *Peer J*, e7323. <https://doi.org/10.7717/peerj.7323>
- Weng, H., Lv, J., Cen, H., He, M., Zeng, Y., Hua, S., Li, H., Meng, Y., Fang, H., & He, Y. (2018). Hyperspectral reflectance imaging combined with carbohydrate metabolism analysis for diagnosis of citrus Huanglongbing in different seasons and cultivars. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 275, 50-60. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.08.020>