



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO
División Académica de Ciencias Biológicas



**“METODOLOGÍA PARA DETECCIÓN TEMPRANA DEL
HUANGLONGBING EN CULTIVO DE (*Citrus latifolia tanaka*)”**

Trabajo recepcional, en la modalidad de:

Tesis de Doctorado

Para obtener el grado de:

Doctorado en Ciencias en Ecología y Manejo
de Sistemas Tropicales

Presenta:

M. en C. Gladis Yanet Martínez Martínez

Director:

Dr. Adalberto Galindo Alcántara

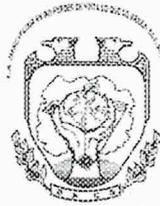
Villahermosa, Tabasco, México

Junio, 2022



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN**

Villahermosa, Tab., a 02 de Mayo de 2022

ASUNTO: Autorización de Modalidad de Titulación

**C. LIC. MARIBEL VALENCIA THOMPSON
JEFE DEL DEPTO. DE CERTIFICACIÓN Y TITULACION
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES
P R E S E N T E**

Por este conducto y de acuerdo a la solicitud correspondiente por parte del interesado, informo a usted, que en base al reglamento de titulación vigente en esta Universidad, ésta Dirección a mi cargo, autoriza a la **C. GLADIS YANET MARTÍNEZ MARTÍNEZ** egresada del Doctorado en **CIENCIAS EN ECOLOGÍA Y MANEJO DE SISTEMAS TROPICALES** de la División Académica de **CIENCIAS BIOLÓGICAS** la opción de titularse bajo la modalidad de Tesis de Doctorado denominado: **"METODOLOGÍA PARA DETECCIÓN TEMPRANA DEL HUANGLONGBING EN CULTIVO DE Citrus latifolia tanaka"**.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para saludarle afectuosamente.

A T E N T A M E N T E


**DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR DE LA DIVISIÓN ACADEMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**

**U.J.A.T.
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**



DIRECCIÓN

C.c.p.- Expediente Alumno de la División Académica
C.c.p.- Interesado



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN**

MAYO 16 DE 2022

**C. GLADIS YANET MARTÍNEZ MARTÍNEZ
PAS. DEL DOCTORADO EN CIENCIAS EN ECOLOGÍA Y
MANEJO DE SISTEMAS TROPICALES
P R E S E N T E**

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 80 al 85 del Cap. III del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis de Doctorado en Ciencias en Ecología y Manejo de Sistemas Tropicales titulado: **"METODOLOGÍA PARA DETECCIÓN TEMPRANA DEL HUANGLONGBING EN CULTIVO DE Citrus latifolia tanaka"**, asesorado por el Dr. Adalberto Galindo Alcántara, sobre el cual sustentará su Examen de Grado, cuyo jurado está integrado por el Dra. Silvia del Carmen Ruiz Acosta, Dr. Luis Alberto Olvera Vargas, Dr. Adalberto Galindo Alcántara, Dr. Rufo Sánchez Hernández, Dr. José Ángel Gaspar Génico, Dr. Miguel Ángel Palomeque de la Cruz y Dr. Miguel Alberto Magaña Alejandro.

Por lo cual puede proceder a concluir con los trámites finales para fijar la fecha de examen.

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE

**DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR**

**U.J.A.T.
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**



DIRECCIÓN

C.c.p.- Expediente del Alumno.
C.c.p.- Archivo

CARTA AUTORIZACIÓN

El que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto física como digitalmente el Trabajo Recepcional en la modalidad de Tesis de doctorado denominado: **“METODOLOGÍA PARA DETECCIÓN TEMPRANA DEL HUANGLONGBING EN CULTIVO DE Citrus latifolia tanaka”**, de la cual soy autor y titular de los Derechos de Autor.

La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco el Trabajo Recepcional antes mencionada, será única y exclusivamente para difusión, educación y sin fines de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa más no limitativa para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID) y a cualquier otra red académica con las que la Universidad tenga relación institucional.

Por lo antes manifestado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación de la tesis mencionada y para los fines estipulados en este documento.

Se firma la presente autorización en la ciudad de Villahermosa, Tabasco a los 16 días del mes de Mayo de dos mil veintidós.

AUTORIZO



GLADIS YANET MARTÍNEZ MARTÍNEZ



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

“ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE”



Jefatura de Posgrado

**División
Académica
de Ciencias
Biológicas**



2022 Flores
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

Villahermosa, Tabasco a 12 de mayo de 2022.

M. EN C. GLADIS YANET MARTÍNEZ MARTÍNEZ
EST. DEL DOCTORADO EN CIENCIAS EN ECOLOGÍA
Y MANEJO DE SISTEMAS TROPICALES
PRESENTE

En cumplimiento de los lineamientos de la Universidad, y por instrucciones de la Dirección de Posgrado, se implementó la revisión de los documentos recepcionales (tesis), a través de la plataforma Turnitin iThenticate para evitar el plagio e incrementar la calidad en los procesos académicos y de investigación en esta División Académica. Esta revisión se realizó en correspondencia con el Código de Ética de la Universidad, el Reglamento General de Estudios de Posgrado, el Código Institucional de Ética para la Investigación y con los requerimientos para los posgrados en el PNPC-CONACyT.

Por este conducto, hago de su conocimiento las observaciones y el reporte de originalidad de su documento de tesis. Con el objetivo de fortalecer y enriquecer el programa de posgrados, la Coordinadora Académica del DCEMST, realizó la revisión del documento en la plataforma iThenticate, obteniendo el reporte de originalidad, el índice de similitud y emitió las siguientes sugerencias y recomendaciones para dar seguimiento en el documento de tesis del proyecto de investigación **“Metodología para detección temprana del Huanglongbing en cultivos de *Citrus latifolia tanaka*”**

OBSERVACIONES:

1. Existe un índice de similitud del 14% de coincidencias, considerado bajo y dentro del estándar (15 - 20%) de tolerancia de acuerdo a las Políticas y Lineamientos para el uso y manejo del Software Antiplagio de la UJAT. Por lo que se demuestra el nivel de originalidad del documento y la investigación. Algunas referencias llevan al artículo publicado <https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/3511>





**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**División
Académica
de Ciencias
Biológicas**

Jefatura de Posgrado



2. El índice de similitud del 2%, se distribuye en porcentaje de las fuentes primarias de citación de internet específicamente Springer Link y el resto distribuido entre 1% y <1% de DOCPLAYER y revistas con publicaciones relacionadas con la línea de generación y aplicación de conocimiento.
3. Se adjunta, el reporte de revisión de la tesis a través de la herramienta Turnitin iThenticate.
4. Finalmente, se le solicita a la M. en C. Martínez Martínez, integrar en la versión final de tesis, este oficio e informe de originalidad, realizado por el Turnitin iThenticate

Sin otro particular al cual referirme, aprovecho la oportunidad para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"


DR. ALLAN KEITH CRUZ RAMÍREZ
JEFATURA DE POSGRADO

UJAT



**DIVISION ACADÉMICA
CIENCIAS BIOLÓGICAS
JEFATURA DE POSGRADO**

C.C.P. Dr. Adalberto Galindo Alcántara. Director de Tesis.

Archivo

Metodología para detección temprana del Huanglongbing en cultivos de Citrus latifolia tanaka

INFORME DE ORIGINALIDAD

14%

ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

1	link.springer.com Internet	322 palabras — 2%
2	www.cesavebc.com Internet	198 palabras — 1%
3	docplayer.es Internet	179 palabras — 1%
4	www.scielo.org.mx Internet	166 palabras — 1%
5	iefectividad.conanp.gob.mx Internet	151 palabras — 1%
6	ambiental.uaslp.mx Internet	119 palabras — 1%
7	guzlop-editoras.com Internet	66 palabras — < 1%
8	R J Monsreal-Ceballos, E Ruiz-Sánchez, H S Ballina-Gómez, A Reyes-Ramírez, A González-Moreno. "Effects of Botanical Insecticides on Hymenopteran Parasitoids: a Meta-analysis Approach", Neotropical Entomology, 2018 Crossref	65 palabras — < 1%

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) le agradezco la beca recibida durante el doctorado.

A la División Académica de Ciencias Biológicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco por el apoyo otorgado para la estancia, así como los cursos y talleres recibidos.

Al director de esta tesis, el Doctor Adalberto Galindo por su apoyo, dedicación y paciencia. Gracias por su confianza.

A la Doctora Silvia del Carmen Ruiz Acosta por su confianza y valiosa ayuda en la revisión del desarrollo de este proyecto.

Doctor Luis Alberto Olvera Vargas, Doctor Horacio Ballina. Mil gracias por todas sus recomendaciones acertadas que me ayudaron a mejorar este trabajo.

Un agradecimiento especial al personal de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) por todas las facilidades otorgadas durante el desarrollo de esta tesis.

A mis compañeros y amigos que me ayudaron y alentaron a continuar.

Muchas gracias.

DEDICATORIA

A mi amada Natalia y mi compañero de vida Candelario, por acompañarme en todo momento y ser mi inspiración para continuar cada día.

México.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

Resumen

Los beneficios que aporta el cultivo de limón, se encuentran seriamente amenazados por la enfermedad Huanglongbing (HLB), la cual se detectó en Tabasco en Diciembre de 2012. Esta enfermedad ha dañado hasta un 100% las plantaciones de cítricos en China y Florida, y en México ha producido grandes pérdidas como el caso del estado de Colima, dejando a los productores y al Estado afectado económica, social y ambientalmente, ya que se tienen que eliminar los árboles dañados. El uso de técnicas de teledetección presenta la oportunidad de realizar detecciones rápidas, efectivas y de bajo costo en grandes áreas. Es por ello que en este trabajo se desarrollo una serie de pasos para lograr la detección del HLB, donde por medio de un modelo de zonas potenciales para el establecimiento de la enfermedad se detectó el área con mayor riesgo, la cual se utilizó como zona de estudio. Posteriormente se realizó un metanálisis dando como resultado la identificación de variables que sirvieron para desarrollar el método de detección del HLB por medio de percepción remota. Como resultado se evaluó la viabilidad de las imágenes del satélite Landsat 8 logrando determinar que de todas las bandas la que indicó mayor separabilidad de clases fue la banda azul presentando diferencias estadísticamente significativas.

El análisis de la detección de la enfermedad del HLB en cultivos de *Citrus latifolia* Tanaka por medio de técnicas de percepción remota es una excelente opción disminuyendo tiempo, costos y daños a los cultivos. Sin embargo, se requiere más estudios en el uso de imágenes de mediana resolución para una efectiva valoración en la detección de la enfermedad.

Abstract

The benefits provided by lemon cultivation are threatened by the Huanglongbing (HLB) disease, which was detected in Tabasco in December 2012. This disease has damaged up to 100% of citrus plantations in China and Florida, and in Mexico has produced great losses, as in the case of the state of Colima, leaving the producers and the State economically, socially and environmentally affected, since the damaged trees have to be eliminated. The use of remote sensing techniques presents the opportunity to perform rapid, effective and low-cost detection over large areas. That is why in this work a series of steps were developed to achieve the detection of HLB, where by means of a model of potential zones for the establishment of the disease, the area with the greatest risk was detected, which was produced as an area of study. Subsequently, a meta-analysis was carried out, resulting in the identification of variables that served to develop the HLB detection method by means of remote sensing. As a result, the feasibility of the Landsat 8 satellite images was evaluated, determining that of all the bands, the one that indicates the greatest class separability was the blue band, presenting statistically significant differences.

The analysis of the detection of HLB disease in *Citrus latifolia* Tanaka crops through remote sensing techniques is an excellent option, reducing time, costs and damage to crops. However, more studies are required on the use of medium resolution images for an effective evaluation in the detection of the disease.

Índice de contenidos

Resumen

Abstract

Capítulo 1. Introducción	1
Breve introducción a la percepción remota	1
El cultivo de limón	3
El Huanglongbing de los cítricos y su problemática	4
La percepción remota en la detección del Huanglongbing de los cítricos	7
Planteamiento del problema	10
Pertinencia de la investigación en el programa de Doctorado	11
Justificación	12
Objetivo general	13
Objetivos particulares	13
Hipótesis	13
Estructura de la tesis	14

Capítulo 2. Modelo de zonas potenciales para el establecimiento de la enfermedad del Huanglongbing en el estado de Tabasco

Resumen	16
Abstract	17
Introducción	18
Materiales y métodos	20
Resultados	23
Discusión	26
Conclusiones	31

Capítulo 3. Meta-analysis of the precision in the detection of HLB by means of remote sensing

Abstract	33
Introduction	34

Materials and methods	35
Results	37
Discussion	45
Conclusions	51
Capítulo 4. Uso de imágenes satelitales para identificación de parcelas de limón con presencia de Huanglongbing	
Resumen	54
Introducción	55
Materiales y métodos	57
Resultados y discusión	58
Conclusión	64
Capítulo 5. Consideraciones finales	65
Referencias	66

Índice de tablas

Tabla 1. Variables climáticas y edafológicas utilizadas para la modelación de la distribución potencial de la enfermedad del huanglongbing en el estado de Tabasco.	22
Tabla 2. Contribuciones relativas de las variables climáticas y edafológicas utilizadas en la modelación de la distribución potencial de la enfermedad del huanglongbing en el estado de Tabasco.	27
Table 3. Classes included in the study group classification method.	38
Table 4. Classes included in the study group Measurement equipment.	40
Table 5. Classes encompassed in the Image Type study group.	42
Table 6. Classes included in the Wavelength study group.	43
Tabla 7. Prueba T-Student para índice NDVI calculados para las parcelas positivas (con HLB) y negativas (sanas).	62
Tabla 8. Prueba t-Student para índice GCI calculados para las parcelas positivas (con HLB) y negativas (sanas).	63

Índice de figuras

Figura 1. Mapa de localización del área de estudio. Los puntos muestran las detecciones positivas de HLB en material vegetal.	21
Figura 2. Modelo de distribución potencial de la enfermedad del huanglongbing en el estado de Tabasco.	25
Figura 3. Distribución potencial en km ² por clase para cada municipio.	25
Figura 4. Área bajo la curva (AUC) de <i>Candidatus Liberibacter asiaticus</i> , operada por el receptor ROC para los datos de entrenamiento y datos de prueba del modelo.	26
Figura 5. A) Plantaciones de cítricos en Huimanguillo en contraste con el modelo de distribución potencial. B) Zonas con riesgo medio-alto	

en los municipios de Comalcalco, Cárdenas y Cunduacán en contraste con plantaciones cítricas. C) Noreste de Balancán con riesgo alto de acuerdo con el modelo de distribución potencial. 28

Figure 6. Effect size (mean and 95% confidence interval) of the precision of the methods in the detection of HLB. Effect sizes with confidence intervals that do not overlap with zero are considered significant. The number of studies used to calculate each mean is shown for each analysis. The * indicates statistical robustness of the nfs, effect size (E++) and 95% CI Bias is presented for all response variables. 39

Figure 7. Effect size (mean and 95% confidence interval) of the precision of the measurement equipment in the detection of HLB. Effect sizes with confidence intervals that do not overlap with zero are considered significant. The number of studies used to calculate each mean is shown for each analysis. The * indicates statistical robustness of the nfs, effect size (E++) and 95% CI Bias is presented for all response variables. 41

Figure 8. Effect size (mean and 95% confidence interval) of image type precision in the detection of HLB. Effect sizes with confidence intervals that do not overlap with zero are considered significant. The number of studies used to calculate each mean is shown for each analysis. The * indicates statistical robustness of the nfs, effect size (E++) and 95% CI Bias is presented for all response variables. 42

Figure 9. Effect size (mean and 95% confidence interval) of wavelength precision in detecting HLB. Effect sizes with confidence intervals that do not overlap with zero are significant. The number of studies used to calculate each mean is shown for each analysis. The * indicates statistical robustness of the nfs, effect size (E++) and 95% CI Bias is presented for all response variables. 44

Figura 10. Resumen de las estadísticas de bandas espectrales individuales del espectro visible del satélite Landsat 8 calculados para las parcelas con categoría Positiva (con HLB) y Negativos (sanas). 59

Figura 11. Resumen de las estadísticas de las bandas NEAR, SWIR1 y SWIR2 del satélite Landsat 8 calculados para las parcelas con categoría Positiva (con HLB) y Negativos (sanas). 60

Figura 12. Respuesta espectral esperada de hojas enfermas  y sanas  tomado de Franklin (2001). 61

Introducción

Breve introducción a la percepción remota

La ciencia y la tecnología espacial han presentado un extraordinario desarrollo desde el lanzamiento del primer satélite artificial “Sputnik” en 1957 (Catuna, 1995), a partir de entonces los satélites generan información de nuestro entorno a través de sensores, los cuales son utilizados en la percepción remota. Este término fue acuñado por Evelyn Pruitt en 1960 (Butler, *et al.*, 1990), y a partir de ahí se han generado diversos conceptos para hacer referencia al término. Siendo considerada como una técnica, herramienta o ciencia dependiendo del uso o enfoque que se le quiera dar, un ejemplo de ello es el de Chuvieco (2010), quien la menciona como una técnica que permite explorar en diferentes bandas casi todos los aspectos de nuestro planeta, adquiriendo imágenes de la superficie terrestre desde sensores aéreos o espaciales.

También, Martínez y Díaz (2005) y Araque y Jiménez (2009), la definen como la ciencia y arte de obtener información de un objeto, analizando los datos adquiridos mediante algún dispositivo que no está en contacto físico con dicho objeto. Y de acuerdo a Fernando y Bocco (2003), el objetivo principal de la percepción remota, es obtener información cualitativa y cuantitativa de la radiación electromagnética reflejada o emitida por la superficie terrestre. Para este trabajo se percibe a la percepción remota como la ciencia y arte de obtener información de la materia (cultivos de limón) de forma remota por medio de sensores que utilizan energía electromagnética.

Para la recopilación de la información, han desarrollado herramientas como los sensores, que están compuestos por miles de detectores diminutos que miden la cantidad de radiación electromagnética que reflejan los objetos (Gomez *et al.*, 2013) y están clasificados por pasivos y activos (Lira, 1995), los cuales están dados por el tipo de señal electromagnética que captan. Los sensores activos generan ellos mismos la radiación que miden tras ser reflejada, como por ejemplo el sistema LiDAR que se basa en la emisión de pulsos de luz desde una plataforma y la información se obtiene al capturar la señal de retorno (Magdaleno y Martínez, 2006). Por otra parte se encuentran los sensores pasivos, los cuales registran la radiación reflejada o emitida por la superficie terrestre (Lira, 1995), y la reflectancia es medida en varias bandas espectrales (Alonso *et al.*, 1999). Estos sensores son de los más utilizados y pueden ser transportados por plataformas satelitales, aviones y VANT principalmente.

Las técnicas de percepción remota (PR) son un componente determinante de diversas aplicaciones y disciplinas que brindan soporte a la toma de decisiones, al combinar información procedente de varias fuentes (Aguilar, 2015), misma que es utilizada para clasificar, mapear e identificar etapas fenológicas. También, brindan monitoreo y detección de daños por insectos plaga y enfermedades, contaminación de suelos, entre otras aplicaciones, abriendo un abanico de posibilidades en las ciencias agropecuarias y ambientales.

Sin embargo, el procesamiento digital de imágenes multiespectrales e hiperespectrales, que permiten detectar de manera automatizada y con mayor nitidez los cambios en la vegetación mediante operaciones de realce entre dos o más bandas o canales espectrales que permiten diferenciar la vegetación sana de la enferma es relativamente reciente (Rullan, 2015), por lo que ciertos temas requieren de más estudios para alcanzar el potencial que se estima de estos.

El estudio sobre la variación espaciotemporal de la reflectancia, la radiación solar en las bandas del espectro visible, infrarrojo y los índices de vegetación constituyen enfoques importantes para dar una mirada desde lo geográfico a los problemas relacionados con la evaluación de riesgos de plagas y enfermedades, su incidencia, propagación y severidad, así como apoyo a las actividades de muestreo y seguimiento (Araque y Jimenez, 2009).

El cultivo de limón

El limón persa (*Citrus latifolia tanaka*) o limón sin semilla, también conocido en otros países como limón tahití, pérsico, mesina o lima bearss, es un fruto cítrico ácido ovalado de aproximadamente 6 cm de diámetro, de origen tropical (Vásquez y Vásquez, 2014; INIFAP, 2000), cultivado principalmente en China, México, India, Argentina y Brasil, que concentran el 72.2% de la producción mundial (FAOSTAT, 2012). El Limón Persa ocupa el segundo lugar en importancia económica mundial, por su consumo en fresco y uso industrial. Por otra parte, México está considerado como el principal país productor de limón en sus variedades persa y mexicano en el mundo (FAO, 2004).

En México la producción de limas y limones para el año 2013, según datos de la FAO (2015), fue de 2,250 millones de toneladas. Los principales estados recolectores de limón persa o sin semilla son Veracruz, Oaxaca y Tabasco, los cuales obtienen 80% del volumen generado en el país (SAGARPA, 2015). Cabe mencionar que la mayor parte de la cosecha de limón persa o sin semilla que se comercializó en los principales mercados nacionales provino de siete entidades: Campeche, Michoacán, Nayarit, Quintana Roo, Tabasco, Veracruz y Yucatán (SAGARPA, 2011).

En nuestro país, el cultivo de limón es importante al generar una gran cantidad de empleos en los diversos eslabones que integran el sistema producto, como son las actividades en el campo, emparadoras, industria, transporte y comercialización de

fruta o de subproductos (Robles *et al.*, 2011). Y es parte importante en la cultura mexicana al ser un fruto dinámico usado para diversos fines, entre ellos: curativo, preventivo y de aporte vitamínico.

En el estado de Tabasco, la producción de limón se concentra en los municipios de Huimanguillo, Cárdenas y Cunduacán (SAGARPA, 2011), generando empleos para jornaleros, profesionales del campo, la industria, el transporte y proveedores de insumos (Robles *et al.*, 2011). Además, aporta divisas por su venta en el mercado nacional e internacional, con una superficie sembrada de 15,218 ha y una producción estimada de 161,177 toneladas durante 2012, generando una derrama económica de \$259 millones de pesos. Se estima que el número de productores es de 2,536 (SAGARPA, 2013). En el 2010, Huimanguillo se perfiló como municipio líder en el cultivo de limón con una producción de 80,527 toneladas en una superficie cosechada de 6,901 hectáreas (SAGARPA, 2011).

En la actualidad, el cultivo de limón se encuentra amenazado por varias enfermedades todas ellas de importancia comercial. Entre ellas destaca el virus de la tristeza (VTC) y la enfermedad de Huanglongbing (HLB). Esta última ha dañado hasta un 100% de las plantaciones de cítricos en China y Florida, y en México ha producido grandes pérdidas como el caso del estado de Colima con el cultivo de limón, dejando a los productores y al Estado afectado económica, social y ambientalmente, ya que se tienen que eliminar los árboles dañados.

El Huanglongbing de los cítricos y su problemática

El Huanglongbing (HLB) fue reportado en China en 1919 por Reinking, para 1936 la enfermedad ya se había convertido en un grave problema. Los agricultores del distrito de Chaozhou comenzaron a nombrar a la enfermedad como "huang long bing", donde "bing" significa enfermedad, "huang" amarillo y "long" dragón, de esta composición es que se le comenzó a denominar como la enfermedad del dragón amarillo (Hajivand *et al.*, 2009). Sin embargo, no fue hasta 1995 que Huanglongbing

(HLB) se convirtió oficialmente en el nombre para referirse a las variantes africanas, americanas y asiáticas de la enfermedad.

Esta enfermedad es provocada por bacterias filamentosas del género *Candidatus Liberibacter* (Mora-Aguilera *et al.*, 2014). La bacteria está restringida a los elementos cribosos del floema del hospedante y a las glándulas salivales del insecto vector, y puede presentar formas redondas cuando termina su ciclo celular (Camacho-Tapia *et al.*, 2016), al circular por el floema tapa los vasos floemáticos, lo cual impide la circulación de los nutrientes (Alemán *et al.*, 2007). En la planta se distribuye de manera desigual, pero no han detectado la bacteria en el endosperma y embrión de semillas de plantas infectadas (Tatineni *et al.*, 2008), y es transmitida en el continente americano por el Psílido Asiático de los Cítricos (PAC) *Diaphorina citri* Kuwayama (Holguin *et al.*, 2012).

Un síntoma temprano de esta enfermedad es la acumulación de almidón en las hojas (Sarkar *et al.*, 2016). Posteriormente, se presentan síntomas visibles como clorosis foliar, moteado con manchas, color invertido, muerte progresiva de ramitas, mal florecimiento, retraso del crecimiento y frutas asimétricas, las cuales aparecen cerca de seis meses a dos años después de la aparición de la enfermedad (Pourreza *et al.*, 2013; Mirsha *et al.*, 2011; Sankaran y Ehsani, 2011).

La problemática principal de esta enfermedad es la pérdida de plantaciones cítricas, ya que hasta el momento ha ocasionado la eliminación de más de 100 millones de árboles en todo el mundo y la infección avanza rápidamente, ya que en menos de una década se ha extendido por el continente americano (Mara y Peyrou, 2010). En febrero del 2004 se detectó en Brasil (NAPPO, 2012), en Florida EEUU en 2005 (Gottwald *et al.*, 2007), en 2006 en Cuba (Luis *et al.*, 2014), Santo Domingo y Louisiana EEUU en 2008 (Matos *et al.*, 2009), en 2009 en Belice, Carolina del Sur, Jamaica, Guatemala, Puerto Rico y en algunos estados como Yucatán, Quintana Roo, Nayarit y Jalisco en México (SAGARPA, 2010; Matos *et al.*, 2009) y en 2010 el Organismo Internacional Regional de Sanidad Agropecuaria (OIRSA) reportó esta

enfermedad en Nicaragua y en el estado de Campeche en México (Robles y Delgadillo, 2010).

En zonas donde se ha detectado la enfermedad del Huanglongbing, la producción de cítricos es extremadamente problemática y puede reducirse considerablemente, debido a los daños que causa sobre la producción, la rapidez con la que se dispersa a través de insectos vectores, la dificultad de su diagnóstico temprano, el rápido aumento del nivel de incidencia en huertos infectados, los elevados costos económicos y ambientales de su manejo y porque afecta a todas las especies de cítricos, provocando que las plantas nuevas contaminadas no lleguen a producir y las plantas adultas se vuelvan improductivas en un periodo de 2 a 5 años, es considerada como la enfermedad más destructiva para los cítricos en el mundo (FAO, 2013).

En México la enfermedad del Huanglongbing representa una grave amenaza para las 549 mil hectáreas sembradas de cítricos que corresponde al 40% de la superficie nacional sembrada de frutales, y se distribuyen en 23 entidades federativas (como Baja California, Baja California Sur, Chiapas, Campeche, Colima, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Morelos, Nayarit, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, Querétaro, Quintana Roo, San Luis Potosí, Sinaloa, Sonora, Tabasco, Tamaulipas, Veracruz y Yucatán), lo que a su vez representa un riesgo a la producción de 6.7 millones de toneladas anuales, con un valor superior a 8 mil millones de pesos, puesto que representa el 40% de la superficie nacional sembrada de frutales y de ella dependen 69 mil productores y 154 mil empleos directos (SAGARPA, 2010).

En Tabasco, el problema se centra en los programas de trabajo de la campaña contra el Huanglongbing de los cítricos: “con actividades de exploración para detección de síntomas, muestreo de plantas para diagnóstico sintomático, muestreo del psílido y establecimiento de rutas y huertas centinelas (SIVEF: Sitios de Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria), las cuales se consideraron dentro de la campaña de prevención de introducción contra plagas cuarentenarias de los

cítricos”, ya que estas causan afectaciones a sus actividades productivas dejando bajos ingresos a los productores (SAGARPA, 2013).

La percepción remota en la detección del Huanglongbing de los cítricos

El Huanglongbing es una enfermedad letal para los cítricos que, aunque no causa perjuicio a la salud humana (INTA, 2011), si afecta la seguridad alimentaria, el ambiente y la economía. Para minimizar la problemática del Huanglongbing se desarrollan técnicas para su detección y diagnóstico, el cual según García *et al.* (2013), es el paso crítico para el éxito en su control.

Dentro de las diversas técnicas para la detección del HLB, se encuentran las de percepción remota que ofrecen métodos rápidos y fáciles para la detección de enfermedades de las plantas mejorando la productividad agrícola (Pourreza *et al.*, 2014). Esto se logra, debido a que la radiación solar que incide sobre las plantas puede ser absorbida, transmitida y reflejada (Chuvienco, 2010), y están relacionadas fuertemente con la concentración de clorofila (Cabello y Macías, 2011), ya que las plantas establecen sus procesos biológicos gracias a las interacciones que tienen con la radiación solar en aspectos térmicos, fotosintéticos, y fotomorfológicos, presentando un patrón de energía propio y diferente, conocido como firma espectral, que lo distingue del resto de los materiales (Jimenez, *et al.*, 2012).

Las firmas espectrales generadas por las técnicas de percepción remota proporcionan cobertura a escalas de dosel y paisaje (Molina-Serrano *et al.*, 2020) y pueden ser utilizados para detectar árboles potencialmente infectados en un área grande para la detección rápida de zonas infectadas (Kumar *et al.*, 2012), sin la necesidad de procedimientos de laboratorio complejos. El diagnóstico es mucho más rápido y menos costoso que protocolos de detección estándar (Wetterich *et al.*, 2016), debido a que el estado fenológico de cada especie vegetal tiene diferente respuesta espectral (Qin y Zhang, 2005).

Normalmente las plantas sanas presentan picos de absorción en las longitudes de onda de alrededor de 420nm (violeta) y 660nm (rojo) y alta reflectancia en las longitudes de onda verde (570), proporcionando el color característico de muchas plantas (Araque y Jimenez, 2009). Sin embargo, los procesos de reflectancia y absorbancia en las plantas enfermas se invierte, debido a la rápida degradación de la clorofila, mostrando un incremento de la reflectancia en las longitudes de onda roja al infrarrojo próximo (650 – 800 nm) y mayor absorción en las longitudes del azul y verde (410 – 630 nm) (Ranulfi, *et al.*, 2016).

Este comportamiento es observable en plantas enfermas con HLB, sabiendo que los primeros síntomas de esta enfermedad son el color amarillo de la vena y la clorosis asimétrica, indicando una mayor reflectancia en la longitud de onda alrededor de 670 nm (rojo) (Mirsha *et al.*, 2011). Por otra parte, la bacteria causante de la enfermedad del HLB (*Candidatus Liberibacter*), se encuentra alojada en los tubos cribosos del floema (Camacho-Tapia *et al.*, 2016), tapando los vasos floemáticos (Alemán *et al.*, 2007), provocando la acumulación de almidón en las hojas, siendo este un síntoma temprano del HLB (Sarkar *et al.*, 2016). Considerando lo anterior, Pourreza *et al.*, (2013), midieron la reflectancia de almidón en la hoja observando una diferencia entre las hojas enfermas y sanas por medio de la iluminación de una banda estrecha (591 nm) y dos filtros de polarización. Por la naturaleza del estudio, notaron un aumento en la iluminación de las áreas sintomáticas con HLB. Debido a que utilizaron una cámara que fue capaz de capturar la reflectancia mínima de la hoja, sin embargo la técnica que utilizaron hace rotar el plano de polarización de la luz, provocando que las áreas sintomáticas con HLB se resaltarán, creando una mayor reflectancia en la longitud de onda 591 (verde).

Otro de los trabajos donde se logró detectar la enfermedad en etapas asintomáticas por medio de técnicas de percepción remota fueron Ranulfi *et al.* (2016) quienes asumieron que una vez infectados los árboles de cítricos, el metabolismo y composición química del árbol y la hoja se altera. Actualmente estos trabajos

continúan, como el de Sankaran y Ehsani (2012) donde evaluaron la aplicación de la localización de fluorescencia para la detección de Huanglongbing en hojas de cítricos, diferenciando hojas sanas de hojas deficientes en nutrientes y Huanglongbing en cultivares de naranja dulce hamlin y valencia, por medio de un sensor de fluorescencia portátil, proporcionando una alta precisión de clasificación en condiciones de laboratorio y campo.

Garza-Saldaña *et al.* (2017), presentan en su trabajo “métodos para la detección del Huanglongbing (HLB) en cítricos”, estudios basados en análisis y reconocimiento de patrones en imágenes, espectrofotométricos, cromatográficos, entre otros, mostrándolos como alternativas innovadoras y eficientes en tiempo, costo y confiabilidad en la detección de dicha enfermedad.

También, Mishra *et al.* (2011) evaluaron un sensor óptico activo robusto para identificar árboles infectados por Huanglongbing en cultivos de cítricos utilizando bandas espectrales personalizadas (570 nm, 670 nm, 870 nm, 970 nm) para una clasificación fiable, demostrando que el sensor multibanda puede ser usado para detectar árboles cítricos infectados con Huanglongbing bajo condiciones de campo.

A pesar de todas las investigaciones que se han desarrollado sobre la aplicabilidad de la percepción remota en la detección del HLB, aún queda mucho por hacer y descubrir sobre este tema. Por otra parte, la importancia de la rapidez y precisión en la detección de enfermedades como el HLB y el conocimiento sobre las variables de importancia pueden cerrar la brecha entre la agricultura convencional y la percepción remota.

Planteamiento del problema

El cultivo de limón a nivel mundial se encuentra seriamente amenazado por las diversas plagas y enfermedades, una de ellas es el Huanglongbing (HLB), causado por bacterias del género *Candidatus liberibacter* y es considerada como la enfermedad más compleja, destructiva e incurable que genera grandes pérdidas a la industria citrícola (Deng *et al.*, 2020).

Los árboles afectados de cítricos agrios presentan hojas con puntos cloróticos, manchas angulares, acorchamiento y engrosamiento de nervaduras, moteado y clorosis difusa hasta el amarillamiento generalizado en la lámina foliar y defoliación (Flores *et al.*, 2015). Actualmente no existen variedades comerciales, porta injertos resistentes o métodos de control curativos para el HLB (Gonzalez *et al.*, 2020), esto provoca que los árboles se vuelvan improductivos hasta que mueren (Granados-Ramírez y Hernández-Hernández, 2018).

Es por ello que surge la necesidad de contar con herramientas como la percepción remota que ofrece métodos rápidos y fáciles para la detección de enfermedades de las plantas (Pourreza *et al.*, 2014). Estas técnicas han sido ampliamente consideradas en diversos estudios, como los trabajos realizados por Pourreza *et al.* (2014), Li *et al.*, (2013), Mirsha *et al.* (2012), Sarkar *et al.* (2016) entre otros, obteniendo precisiones mayores del 95% en la detección de HLB. Con base en sus resultados, las técnicas de percepción remota son una excelente opción para identificar árboles infectados por la bacteria *Candidatus Liberibacter*.

Sin embargo, a pesar de los diversos estudios realizados bajo la premisa de la percepción remota, aún quedan incertidumbres sobre la variabilidad en sus precisiones, es por ello que es necesario desarrollar una metodología donde se apliquen los conocimientos previos de un análisis exhaustivo sobre las variables a utilizar al momento de la toma de las muestras en campo y así obtener resultados confiables y precisos en la detección de HLB.

Pertinencia de la investigación en el programa de Doctorado

La misión del doctorado es generar conocimientos a partir de la investigación científica, fomentando la cooperación multidisciplinaria para el desarrollo de una cultura productiva sostenible y armoniosa con el ambiente (UJAT, 2019). En relación a lo anterior, la presente investigación se enfocó en el desarrollo de una metodología que sirva para detectar de manera oportuna una de las enfermedades más destructivas para los cítricos en todo el mundo (Granados y Hernández, 2018); el Huanglongbing llamado también HLB, por medio de percepción remota.

Para lograrlo se hizo uso de diversos enfoques como la percepción remota utilizada principalmente para la realización de los análisis, la entomología utilizada para conocer los ciclos de vida del insecto vector, interacciones con la enfermedad y la planta, así como la sistemática que juega un papel importante en la detección de plagas y enfermedades en cultivos, ya que se requiere conocer la biología y ecología tanto de la especie hospedante (Cítrico), el vector (*Diaphorina citri* Kuwayama) y el agente causal (*Candidatus Liberibacter*), para lograr determinar su manejo, detección, control y posible erradicación de manera sustentable. Además, de acuerdo a Madriz (2002), la especificidad en las interacciones planta-patógeno depende tanto del genotipo de la planta como del patógeno, siendo el resultado de una evolución entre ambos organismos. Es así como esta investigación ha dado frutos en el desarrollo de conocimientos científicos multidisciplinarios proporcionando herramientas para futuras generaciones.

Justificación

México aporta el 2.86% de la producción frutícola mundial, con lo cual ocupa el séptimo lugar en importancia entre los 183 países que producen frutas en el mundo (INIFAP, 2013). Entre estas frutas se encuentra el limón, con una producción anual superior al millón de toneladas con un valor superior a los tres mil millones de pesos (Manzanilla-Ramírez *et al.*, 2019). Los principales estados productores de limón son Veracruz, Oaxaca, Tabasco, Yucatán, Colima y Puebla (Caamal, *et al.*, 2014).

En el estado de Tabasco, la producción de limón se concentra en los municipios de Huimanguillo, Cárdenas y Cunduacán (Sagarpa, 2012), generando empleos para jornaleros, profesionales del campo, la industria, el transporte y proveedores de insumos (Robles *et al.*, 2011). Además, las plantaciones de limón llegan a ser refugio para aves, mariposas, insectos, epifitas y algunos mamíferos pequeños.

Los beneficios que aporta el cultivo de limón, se encuentran seriamente amenazados por la enfermedad Huanglongbing, la cual se detectó en Tabasco en Diciembre de 2012 en áreas urbanas del municipio de Tenosique y actualmente se encuentra presente en 41 hectáreas de huertos comerciales de Limón persa en el municipio de Huimanguillo, esta enfermedad es transmitida por el Psílido Asiático de los Cítricos (PAC) *Diaphorina citri* (CESVETAB, 2016). Siendo la más devastadora para los cítricos mundialmente, porque una vez que se introduce la enfermedad, sus epidemias pueden ser relativamente rápidas y destructivas (Bassanezi y Gottwald, 2009).

El control de esta enfermedad se basa en eliminar los árboles afectados, lo que implica cortar con ello todas las interacciones agroecosistémicas, también se utilizan agroquímicos para eliminar al vector (SAGARPA-SENASICA, 2013). Sin embargo, el uso indiscriminado de agroquímicos para el control de plagas y enfermedades no solo tiende a promover la resistencia de estos, sino que también repercute en el ambiente y la salud pública.

Por tal motivo, se requiere desarrollar una metodología con criterios adecuados para la detección temprana del Huanglongbing que pueda ser replicable para hacer uso racional de los insumos y evitar su dispersión con medidas sostenibles y oportunas.

Objetivo general

Desarrollar una metodología utilizando técnicas de percepción remota para la detección del Huanglongbing de los cítricos en cultivos de limón persa (*Citrus latifolia tanaka*)

Objetivos particulares

- Determinar las zonas potenciales para el establecimiento de la enfermedad del Huanglongbing en el estado de Tabasco por medio de un modelo de distribución.
- Evaluar a partir de un metanálisis la precisión de los métodos de clasificación calculados por medio de percepción remota para la detección del Huanglongbing
- Desarrollar un método para la detección de la enfermedad del Huanglongbing en cultivos de *Citrus latifolia tanaka* mediante técnicas de percepción remota

Hipótesis

En este trabajo se hipotetizo que la enfermedad del Huanglongbing en cultivos de *Citrus latifolia tanaka* provoca cambios en la estructura interna de las plantas afectando los procesos de absorción y reflectancia. Por lo tanto, las técnicas de percepción remota pueden ser utilizadas para la detección de la enfermedad desarrollando un método sólido que proporcione probabilidades fiables.

Estructura de la tesis

La tesis está formada por cinco capítulos; El presente Capítulo 1 (Introducción) y el Capítulo 5 (Consideraciones finales) corresponden el marco conceptual. Los Capítulos 2 al 4 abordan los objetivos planteados para esta tesis y se describen a continuación:

Capítulo 2 - Desarrolla el primer objetivo específico. A partir del modelo de distribución se identificaron las zonas con potencial para el desarrollo de la enfermedad del HLB en el estado de Tabasco, sirviendo como base para seleccionar el área de estudio de este trabajo. Donde Huimanguillo es una zona con alto potencial para el establecimiento de la enfermedad, además de ser el municipio con mayor superficie sembrada de limón persa en el estado de Tabasco.

Capítulo 3 - Se desarrolla el segundo objetivo específico. Usando la información de 178 estudios, se evaluó por medio de un metanálisis los diversos métodos de clasificación así como las longitudes de onda, equipos de medición y tipos de imagen usados para la detección del HLB, dando como resultado la identificación de variables estadísticamente significativas. Estas variables servirán de apoyo en la elaboración del método para la detección del HLB por medio de percepción remota.

Capítulo 4 – Corresponde al desarrollo del tercer objetivo específico. Se utilizó como base la información obtenida de los primeros objetivos desarrollados en esta tesis. Se evaluó la viabilidad de las imágenes de mediana resolución en la detección del HLB en plantaciones de cítricos, logrando determinar que la banda azul del satélite Landsat 8 puede utilizarse para la detección del HLB en plantaciones de cítricos, esta banda fue la única que presentó diferencias estadísticamente significativas.

Capítulo 2. Modelo de zonas potenciales para el establecimiento de la enfermedad del Huanglongbing en el estado de Tabasco

Extraído de: Martínez-Martínez, G.Y., Ruíz-Acosta, S. del C., Olvera-Vargas, A., Sánchez-Hernández, R. and Galindo-Alcántara, A., 2021. Modelo de zonas potenciales para el establecimiento de la enfermedad del huanglongbing en el estado de Tabasco. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 24(3), p.12. Available at: <https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/3511> [online]

Modelo de zonas potenciales para el establecimiento de la enfermedad del Huanglongbing en el estado de Tabasco

Resumen

Antecedentes. Huanglongbing es una enfermedad letal para los cítricos, afecta a todas las especies citricolas, provocando que las plantas jóvenes que se infectan no lleguen a producir y las plantas adultas se vuelvan improductivas en un periodo de dos a cinco años. Objetivo. El objetivo del presente estudio fue determinar las zonas potenciales para el establecimiento del huanglongbing en Tabasco. Metodología. Para lograr este objetivo se utilizó el modelo de máxima entropía (MaxEnt), el cual es un método de aprendizaje automático de propósito general. Para su validación se aplicó la técnica Receiver Operating Characteristic (ROC) aplicada en modelos de distribución de solo presencia. Para generar el modelo se utilizaron 19 variables climáticas tomadas de Worldclim, una variable edafológica tomada de Jiménez *et al.*, (2013) y se usaron 195 registros de presencia de *Candidatus Liberibacter asiaticus* detectados en material vegetal. Resultados. Los resultados muestran que los municipios de Huimanguillo y Balancán son las áreas de mayor distribución potencial de la enfermedad con valores mayores a 0.7. De acuerdo con el área bajo la curva (AUC), el modelo tiene una alta capacidad de predecir correctamente al presentar valores de 0.936 en los datos de entrenamiento. Implicaciones. El presente estudio podría contribuir a la planeación de zonas de vigilancia para la detección y control de la enfermedad del huanglongbing. Conclusión. El modelo que se obtuvo es una buena aproximación de la presencia potencial de la enfermedad en el estado de Tabasco, dando claridad al momento de elegir las zonas de vigilancia del patógeno y su vector.

Abstract

Background. Huanglongbing is a lethal disease for citrus, affecting all citrus species, causing young plants that become infected fail to produce and adult plants become unproductive for a period of two to five years. **Objective.** The objective of this study was to determine the potential areas for the establishment of huanglongbing in Tabasco. **Methodology.** In order to achieve this objective, the model of maximum entropy (MaxEnt) was used, which is a general purpose machine learning method. For its validation, the Receiver Operating Characteristic (ROC) technique applied in presence-only distribution models was applied. To generate the model, 19 climatic variables taken from Worldclim were used, a soil variable taken from Jiménez *et al.*, (2013) and 195 records of the presence of *Candidatus Liberibacter asiaticus* detected in plant material were used. **Results.** The results show that the municipalities of Huimanguillo and Balancán are the areas with the greatest potential distribution of the disease with values greater than 0.7. According to the area under the curve (AUC), the model has a high ability to predict correctly by presenting values of 0.936 in the training data. **Implications.** The present study could contribute to the planning of surveillance areas for the detection and control of huanglongbing disease. **Conclusion.** The model obtained is a good approximation of the potential presence of the disease in the state of Tabasco, giving clarity when choosing the surveillance areas for the pathogen and its vector.

Introducción

El Huanglongbing (HLB) es una enfermedad provocada por varias especies del género *Candidatus Liberibacter* (Mora-Aguilera *et al.*, 2014). Actualmente es una de las enfermedades más graves que afectan a la citricultura mundial ya que al no existir un fuente de resistencia genética para enfrentarla, puede atacar en distintos grados a todas las variedades de cítricos, ocasionando graves daños en las zonas donde se establece (SADER, 2018). El agente causal obstruye el floema impidiendo la distribución de la savia y provoca la baja calidad de los frutos (Gottwald, *et al.*, 1991; Bové, 2012). Los síntomas varían en función de las variedades y edad de la planta afectada, siendo los árboles jóvenes y vigorosos los que muestran una sintomatología más marcada (Gutiérrez, 2014). En el caso de cítricos agrios, la lámina foliar de plantas infectadas presenta puntos cloróticos, manchas angulares, acorchamiento y engrosamiento de nervaduras, moteado, clorosis difusa y amarillamiento generalizado hasta llegar a la defoliación (Flores *et al.*, 2015).

El Huanglongbing causa serias pérdidas a la citricultura al provocar que los árboles inicialmente se tornen improductivos y posteriormente les cause la muerte. Aunado a ello, no se tiene conocimiento de alguna cura hasta el momento (Granados-Ramírez y Hernández-Hernández, 2018). Esta enfermedad presenta una amplia distribución y rápida diseminación encontrándose presente a lo largo de los continentes asiático, africano y americano (Ferrarezi *et al.*, 2020). En este último se ha extendido rápidamente desde su entrada por Brazil en 2004 llegando a México en menos de una década (Gottwald y Huang, 1991; Mara y Peyrou, 2010; NAPPO, 2012). Su diseminación se debe a la compleja interacción entre hospedero (cítrico), el patógeno asociado (bacteria), el vector que lo transmite (*Diaphorina citri* Kuwayama y *Trioza erytrae*) y el ambiente (principalmente factores climáticos); siendo considerada como la enfermedad más destructiva para los cítricos en el mundo (Santivañez *et al.*, 2013) ya que ha ocasionado la eliminación de más de 100 millones de árboles en todo el mundo (FAO, 2013).

En el continente americano la bacteria es transmitida por el Psílido Asiático de los Cítricos (PAC) *Diaphorina citri* Kuwayama (Holguín *et al.*, 2012). Este psílido fue reportado en México por primera vez en el año 2002, en el estado de Campeche; sin embargo, el HLB se detectó hasta julio 2009 en la localidad del Cuyo, municipio de Tzimin, Yucatán (SINAVEF, 2010). Actualmente, la enfermedad está presente en 24 estados citrícolas del país, incluyendo Tabasco (SENASICA, 2018), donde se detectó por primera vez en septiembre de 2012 en una ruta de muestreo en traspatio con árboles de naranjo agrio en el municipio de Tenosique (SIAP, 2017).

Una herramienta para el estudio de fenómenos geográficos en ecología y sistemática son los modelos de distribución de especies (Peterson, Sánchez-Cordero, Beard, y Ramsey, 2002), que pueden ser epidemiológicamente relevantes para comprender el establecimiento de diversas enfermedades, siendo Huanglongbing una de ellas. En general, los métodos de modelación combinan datos de presencia de las especies con variables ambientales, para crear un modelo de requerimientos de la especie de acuerdo a las variables examinadas (Anderson *et al.*, 2003). Para este trabajo se usó el método de máxima entropía (MaxEnt), el cual es un método de aprendizaje automático de propósito general con una formulación matemática simple y precisa (Phillips *et al.*, 2006). De acuerdo con Ávila Coria *et al.*, (2014) el modelo obtenido con MaxEnt es uno de los que mejor se ajusta a la distribución de especies.

El método de modelado con MaxEnt ha demostrado buenos resultados al generar modelos de distribución para la vigilancia de plagas y enfermedades. Narouei-Khandan *et al.*, (2016), modelaron la distribución de la enfermedad del huanglongbing y su vector (*Diaphorina citri* Kuwayama) con énfasis en Estados Unidos, obteniendo con MaxEnt el valor AUC de 0,69 que indica un modelo aceptable como señala Peterson *et al.*, (2011), pronosticando las ocurrencias actuales de las especies objetivo. Savino *et al.*, (2015), trabajaron también con MaxEnt para predecir la distribución potencial de 3 especies de insectos, donde obtuvieron valores de AUC superiores a 0.9, concluyendo que MaxEnt resulta ser

una herramienta robusta utilizando datos de presencia, incluso con pocos datos, mejorando el desempeño de otras técnicas tradicionales.

El presente estudio tuvo como objetivo determinar las zonas potenciales para el establecimiento de la enfermedad del huanglongbing en el estado de Tabasco, a través del modelo de máxima entropía (MaxEnt), para la identificación de áreas de riesgo, que sirva como insumo para fortalecer los procesos de vigilancia y planeación en el manejo de la enfermedad.

Materiales y métodos

El área de cobertura del modelo corresponde al estado de Tabasco, el cual se ubica en el sureste de la república mexicana entre las coordenadas 17°15'03" y 18°39'03" de latitud norte y 90°59'15" y 94°07'48" de longitud oeste (Figura 1); con superficie de 24, 731 km² lo que representa el 1.3 % del país; forma parte de las provincias fisiográficas de la Planicie Costera del Golfo Sur con el 96 %, y Sierras de Chiapas y Guatemala con el 4 %, presenta clima cálido húmedo con temperatura promedio de 27 C° y una precipitación anual promedio de 2,550 mm (INEGI, 2017).

Para elaborar el modelo se utilizó el programa de predicción MaxEnt versión 3.4.1 ya que además de ser uno de los modelos de distribución de especies más utilizado para simulaciones realistas de hábitats de especies (Yan *et al.*, 2020), ha mostrado un rendimiento superior en la precisión de los pronósticos sobre la distribución de especies (Yi *et al.*, 2017) y presenta mejores resultados al compararlos con otros modelos aun teniendo pocos datos (Zhan *et al.*, 2016).

Ahora bien, la precisión de cualquier modelo incluyendo el presente, depende en gran medida no solo de sus algoritmos de cálculo, sino también de la calidad y confiabilidad de los datos que se utilizan para alimentarlos. En este sentido, los factores ambientales son importantes de considerar, ya que definen la distribución espacial de cualquier especie y con ello la aparición y desarrollo de plagas y enfermedades (Wang *et al.*, 2019). De acuerdo con Kreakie *et al.*, (2012) los

factores bióticos como los registros de presencia de organismos y los abióticos como la temperatura y humedad entre otros, son parte clave en el desarrollo de los modelos de distribución de especies.

Bajo este contexto, las variables climáticas y ambientales más importantes asociadas a la especie en estudio se determinaron a partir de la prueba de Jackknife. Esta prueba crea un gráfico al usar cada variable de manera aislada y adicionalmente genera otro con todas las variables, donde determina la ganancia de cada una en la creación del modelo (Ávila *et al.*, 2014). Las variables climáticas y edafológicas utilizadas para la modelación de la distribución potencial de la enfermedad del huanglongbing en el estado de Tabasco se encuentran enlistadas en la Tabla 1. El modelo también se alimentó con las coordenadas geográficas de registros de casos positivos de presencia de HLB en el estado.

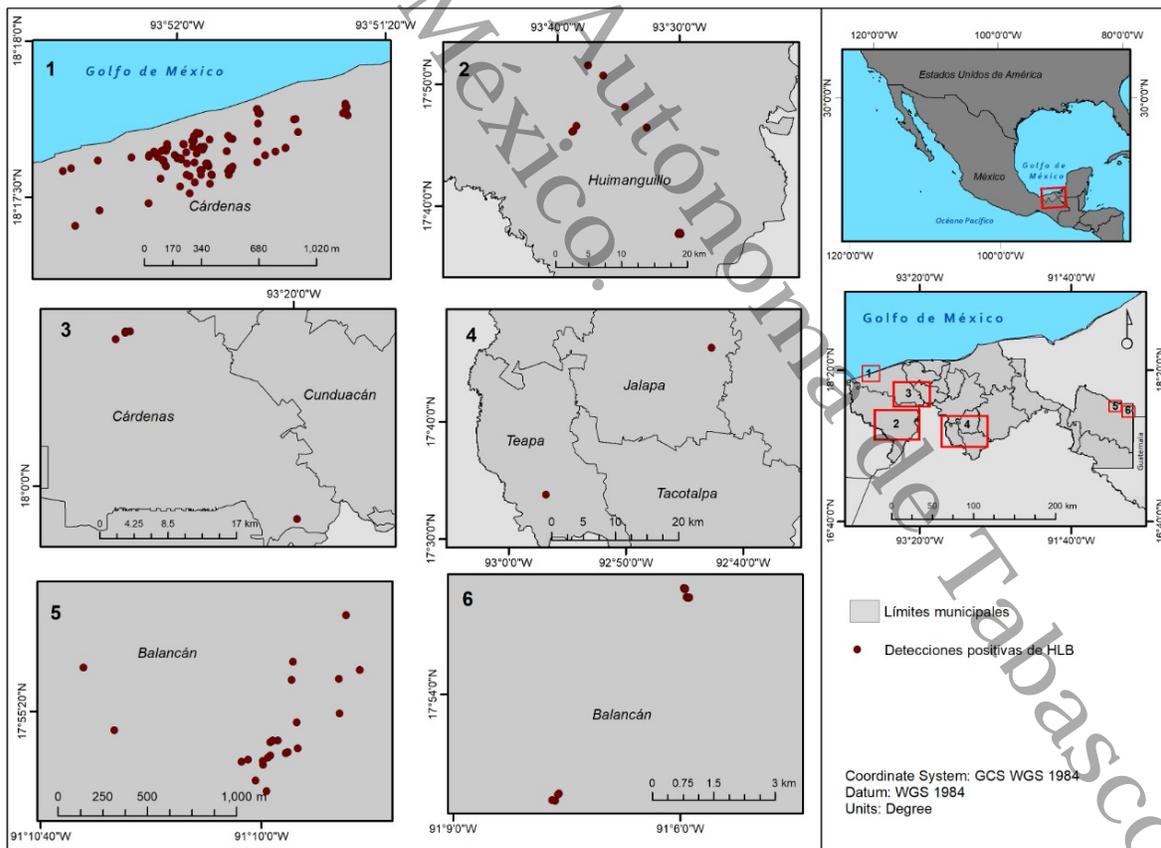


Figura 1. Mapa de localización del área de estudio. Los puntos muestran las detecciones positivas de HLB en material vegetal (Elaborado por los autores).

Tabla 1. Variables climáticas y edafológicas utilizadas para la modelación de la distribución potencial de la enfermedad del huanglongbing en el estado de Tabasco.

Variable	Variable
Temperatura promedio anual	Temperatura promedio del trimestre más frío
Oscilación diurna de la temperatura	Precipitación anual
Isotermalidad	Precipitación del periodo más lluvioso
Estacionalidad de la temperatura	Precipitación del periodo más seco
Temperatura máxima promedio del periodo más cálido	Estacionalidad de la precipitación
Temperatura mínima promedio del periodo más frío	Precipitación del trimestre más lluvioso
Oscilación anual de la temperatura	Precipitación del trimestre más seco
Temperatura promedio del trimestre más lluvioso	Precipitación del trimestre más cálido
Temperatura promedio del trimestre más seco	Precipitación del trimestre más frío
Temperatura promedio del trimestre más cálido	Tipos de suelos

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Worldclim.

La ubicación geoespacial de los casos positivos de huanglongbing (Figura 1) en el estado de Tabasco fueron tomados de los registros de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) del estado de Tabasco; estos datos fueron revisados, eliminándose los registros con coordenadas erróneas (fuera del área de estudio, duplicados, coordenadas incompletas), obteniéndose 195 referencias de presencia de *Candidatus Liberibacter asiaticus* que se integraron en una base de datos para ser utilizados en el software QGis 2.18.19.

La información ambiental se obtuvo de la base de datos de Worldclim (www.worldclim.org), que incluye 20 variables climáticas (Tabla 1), de tipo ráster con resolución de 1 km²; las cuales, se recortaron para el estado de Tabasco. Así mismo, se utilizó el mapa de suelos de Tabasco tomado de (Jiménez, Palma, Zavala, y Bautista, 2013). Todas las capas se almacenaron en formato ASCII.

De los registros de presencia, el 75% fueron utilizados como puntos de entrenamiento (Phillips *et al.*, 2006) y el 25% como puntos de validación, empleándose un máximo de 500 iteraciones. En la modelación se consideró una prueba de sensibilidad gráfica de área bajo la curva (AUC) y la prueba de Jackknife

que evalúa la importancia variable (Narouei-Khandan *et al.*, 2016), las cuales son implementos de MaxEnt.

Para el análisis se utilizó el área bajo la curva (AUC) la cual traza predicciones positivas verdaderas contra predicciones falsas positivas calculándose en una matriz de confusión que comprende la frecuencia de cada tipo de predicción binaria (Narouei-Khandan *et al.*, 2016), estimando la capacidad de predicción. En general, los valores del AUC entre 0.7 y 0.9 para los datos de entrenamiento y de prueba, indican que el modelo es bueno y aquellos con valores mayores a 0.9 como modelos muy buenos representando mayor probabilidad de ocurrencia de la especie (Peterson *et al.*, 2011).

Resultados

En el estado de Tabasco la distribución potencial de la enfermedad del huanglongbing se presenta con una fuerte variabilidad entre las diferentes zonas que lo conforman. En el modelo generado, los valores para las distintas zonas oscilaron entre 0.01 a 0.95. A partir de estos valores se determinaron cuatro clases de distribución potencial de la enfermedad, donde se puede observar que más del 60% (15,496.4 km²) de la superficie perteneciente a la entidad cuenta con muy baja probabilidad de presencia del HLB. De igual forma, el modelo muestra que únicamente el 7% del territorio estatal equivalente a 1,596.90 km² presenta una alta distribución potencial de la enfermedad y que esta se concentra principalmente en torno a las partes Suroeste y Este del estado, hacia los municipios de Huimanguillo y Balancán respectivamente (Figura 2). El resto del territorio analizado (30%) en el modelo se encuentra entre las clases con bajo (4,622.88 km²) y medio (2,745.56 km²) potencial de distribución del HLB. Esta última clase se encuentra fragmentada en gran parte del territorio en la entidad, mostrando mayores áreas de distribución potencial en comparación con las clases alta y media. En la figura 2 puede observarse a mayor detalle la distribución de las clases en el territorio cubierto por el modelo.

Del modelo de distribución potencial para el estado de Tabasco se graficaron las clases por municipios de acuerdo con sus superficies mostrando que, de los 17 municipios que conforman el estado, cuatro concentran un alto potencial de distribución para el HLB con valores entre 0.503-0.950 (Figura 2), de los cuales el de mayor superficie es el municipio de Huimanguillo con 1139 km², seguido de Balancán con 358.17 km², Cárdenas con 75.93 km² y Teapa con 16.43 km² (Figura 3). Mientras que las clases con potencial medio y bajo mostraron a los municipios de Cárdenas y Huimanguillo como los de mayor superficie (Figura 3). Por otro lado, los municipios de Centla, Jonuta y Nacajuca presentan una distribución con potencial muy bajo (Figura 3).

En la figura 4 se observa la curva Receiver Operating Characteristic (ROC) y su ajuste del modelo generado, la especificidad (probabilidad de obtener un resultado negativo sea ausente o presente) se mantiene en cero o con valores menores a 0.1 hasta que la sensibilidad (probabilidad de obtener un resultado de presencia cuando la especie está presente) alcanza valores superiores a 0.8, lo que nos da como valores del área bajo la curva (AUC) de 0.936 en los datos de entrenamiento, lo que sugiere que el modelo tiene una alta capacidad de predecir correctamente (Phillips *et al.*, 2006).

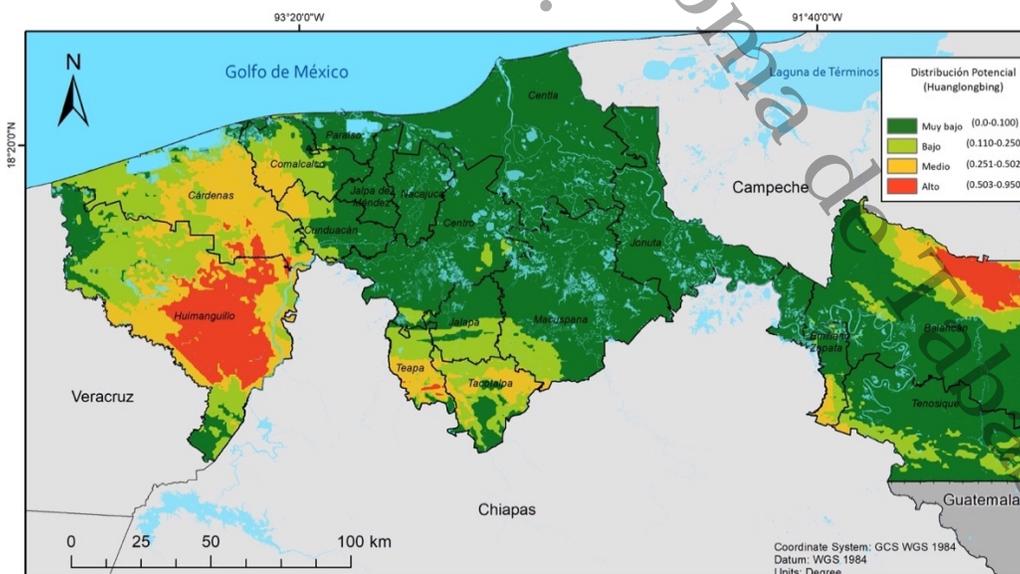


Figura 2. Modelo de distribución potencial de la enfermedad del huanglongbing en el estado de Tabasco (Fuente: elaborado por los autores).

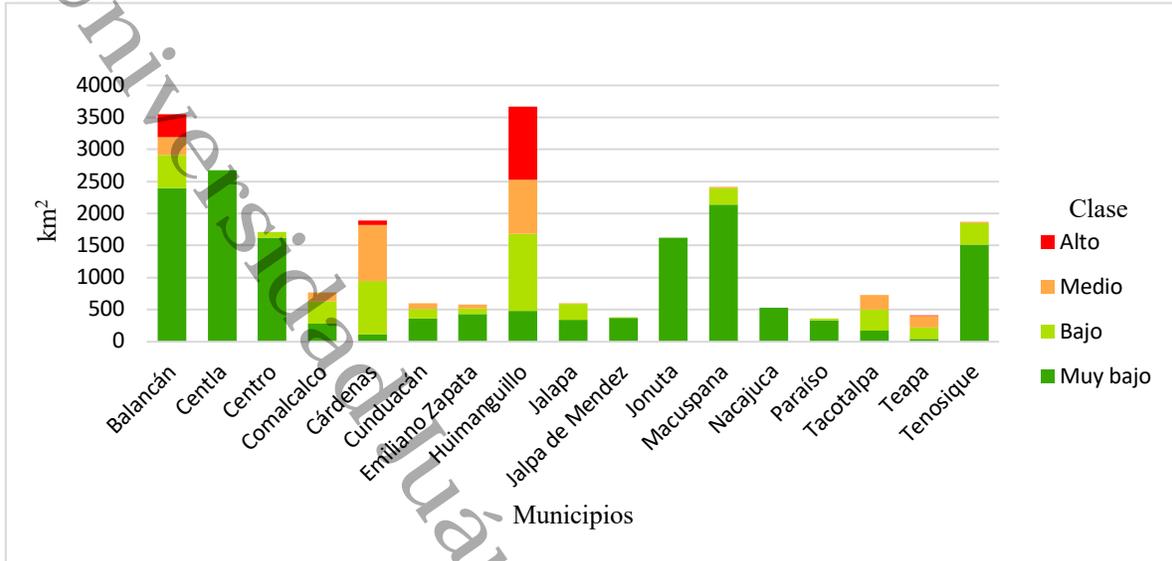


Figura 3. Distribución potencial en km² por clase para cada municipio.

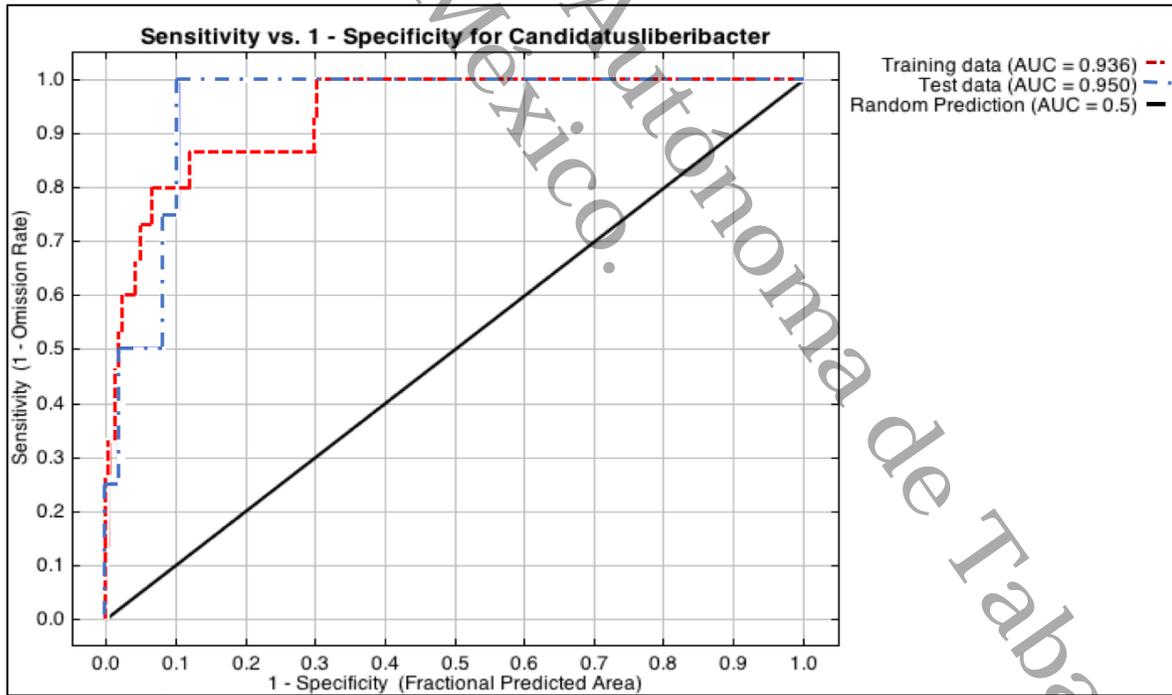


Figura 4. Área bajo la curva (AUC) de *Candidatus Liberibacter asiaticus*, operada por el receptor ROC para los datos de entrenamiento y datos de prueba del modelo.

Los parámetros climáticos tuvieron una fuerte influencia en el modelo generado para la distribución potencial de la enfermedad del Huanglongbing en el estado de Tabasco. Las variables con mayor incidencia fueron la temperatura promedio del periodo más cálido y la oscilación anual de la temperatura (Tabla 2). Los diferentes tipos de suelo existentes en el área de cobertura del modelo contribuyeron conjuntamente en buena medida al alcanzar el 89% de interacción del modelo.

Discusión

Los modelos de distribución de especies han demostrado ser herramientas de gran utilidad para identificar zonas de riesgo potencial para plagas y enfermedades (Srivastava, *et al.*, 2019). Estos modelos predicen con gran precisión la ubicación de nichos de patógenos y vectores en función de la interacción de variables ambientales con el registro actualizado de su presencia en campo (Cruz-Cárdenas, *et al.*, 2014). Uno de los modelos de distribución de especies más utilizado en simulaciones realistas de hábitats de especies (Yan *et al.*, 2020) por la precisión de sus pronósticos de distribución (Yi *et al.*, 2017) y resultados aun cuando se tengan pocos datos es MaxEnt (Zhan *et al.*, 2016).

Tabla 2. Contribuciones relativas de las variables climáticas y edafológicas utilizadas en la modelación de la distribución potencial de la enfermedad del huanglongbing en el estado de Tabasco.

Variable	Contribución al modelo (%)
Isotermalidad	0.1
Estacionalidad de la temperatura	1.1
Temperatura máxima promedio del periodo más cálido	<u>24.4</u>
Temperatura mínima promedio del periodo más frío	0.5
Oscilación anual de la temperatura	<u>12.7</u>
Temperatura promedio del trimestre más lluvioso	1.1
Temperatura promedio del trimestre más cálido	0.7
Temperatura promedio del trimestre más frío	<u>42.9</u>
Precipitación del periodo más lluvioso	1.9
Precipitación del periodo más seco	1.2
Precipitación del trimestre más lluvioso	1.9
Precipitación del trimestre más cálido	2
Precipitación del trimestre más frío	0.3
Tipos de suelos	<u>9.1</u>

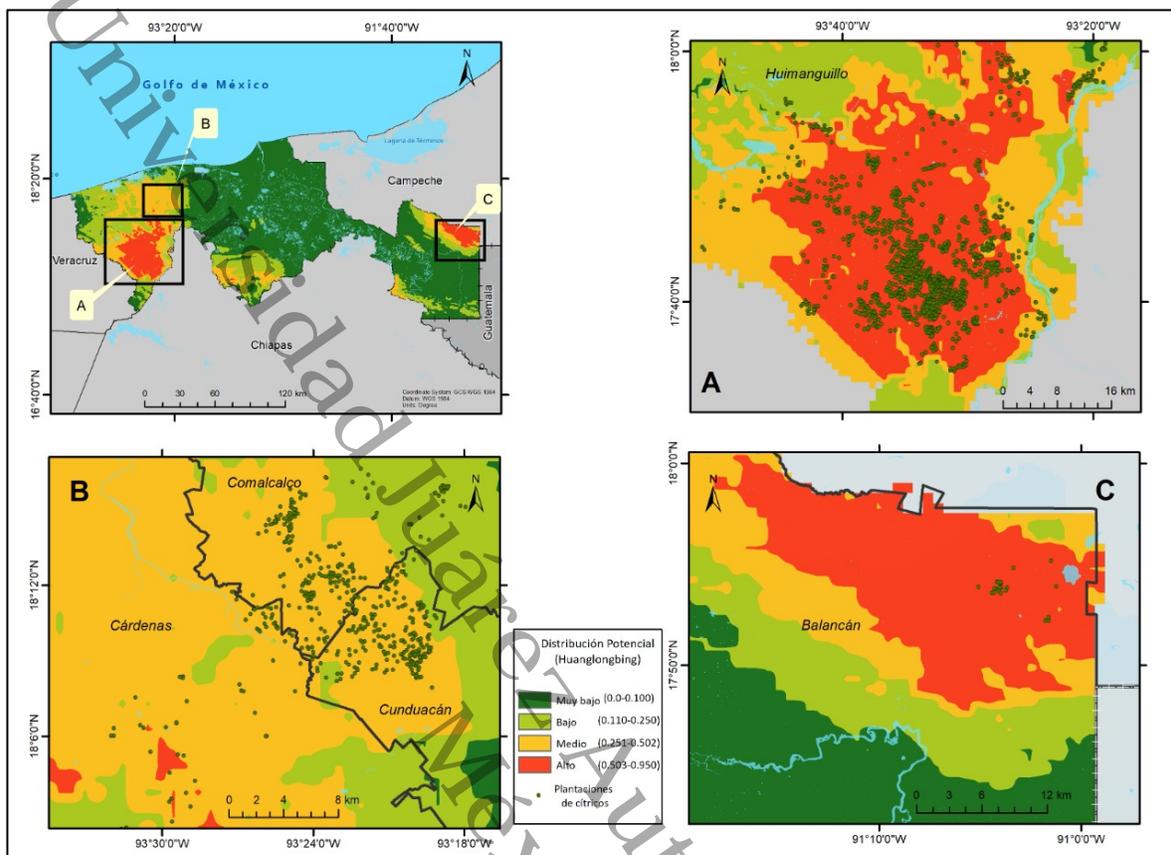


Figura 5. A) Plantaciones de cítricos en Huimanguillo en contraste con el modelo de distribución potencial. B) Zonas con riesgo medio-alto en los municipios de Comalcalco, Cárdenas y Cunduacán en contraste con plantaciones cítricas. C) Noreste de Balancán con riesgo alto de acuerdo con el modelo de distribución potencial (Fuente: elaborado por los autores).

La distribución potencial de la enfermedad del huanglongbing para el estado de Tabasco estimada a partir del programa MaxEnt utilizando los registros de presencia, así como 20 variables climáticas y ambientales, muestra una mayor probabilidad de presencia en la zona norte de Balancán y en el 87% del municipio de Huimanguillo. Como se observa en la figura 5-A, las parcelas de cítricos de Huimanguillo serían las que estarían en mayor riesgo ya que a este municipio corresponde el 94.1% de la producción estatal; es decir, 14,647 hectáreas sembradas con cítricos que se traduce en una gran cantidad de hospederos para el vector de la enfermedad (SIAP, 2019).

Palomo *et al.*, (2017), mencionan que la bacteria presenta una perfecta adaptación con su hospedador (cítricos) y su vector (*Diaphorina citri* Kuwayama). Al mismo tiempo que esta prefiere elevaciones bajas de 360 m.s.n.m. y tolera temperaturas calurosas entre los 27 a 35 °C (Ramos, 2008), lo que coincide con las elevaciones y temperaturas que registra el municipio de Huimanguillo, además de la gran cantidad de hospederos del vector que presenta al ser el mayor productor de cítricos en el estado de Tabasco con 82 mil 95 toneladas para el año 2018 (SADER, 2018). Esto sugiere que el modelo de distribución de la enfermedad huanglongbing generado coincide con los requerimientos ecológicos de la bacteria *Candidatus Liberibacter asiaticus* responsable de la enfermedad.

Por otra parte, las variables con mayor contribución al modelo coinciden con los obtenidos por Olvera-Vargas *et al.*, (2020) donde las variables “rango anual de temperatura y temperatura máxima del mes más cálido” crean condiciones adecuadas para el establecimiento del vector y la enfermedad. Igualmente, los resultados que obtuvieron Ajene *et al.*, (2020) en su estudio para África, mostraron que las variables precipitación y temperatura son las de mayor contribución al modelo.

En este sentido, el ajuste del modelo es muy bueno con un AUC de 0.936 para los datos de entrenamiento y de acuerdo con Benito y Peñas, (2007), la técnica Receiver Operating Characteristic (ROC) es aceptada como un método estándar para evaluar la exactitud de los modelos de distribución predictiva. También, es importante considerar las variables climáticas en la elaboración del modelo, ya que se está expuesto a tener errores en el diseño, por lo que es importante agregar información como tipos de suelos, influencia antropogénica, entre otras, para generar un modelo más completo y cercano a la realidad (Palma-Ordaz y Delgadillo-Rodríguez, 2014). Para este trabajo se utilizó la capa de suelos de (Jiménez *et al.*, 2013), la cual es una variable que influye en el modelo generado, con una contribución de 9.1%.

Tal como señalan Torres-Pacheco *et al.*, (2013), Tabasco se encuentra entre los estados con máxima idoneidad en temperatura para el cultivo de cítricos, favoreciendo esta variable la producción de brotes vegetativos que aumentan el establecimiento de *Diaphorina citri* Kuwayama. Actualmente, se encuentran alrededor de 2204 parcelas de cítricos en todo el estado con cultivos de limón, naranja, tangerina y toronja. De estas, se ha detectado la enfermedad del huanglongbing en 151 parcelas acorde con los datos de la SADER. Por otro lado, la zona citrícola de Comalcalco (Figura 5-B) se encuentra libre de la enfermedad, pero presenta un nivel de riesgo potencial medio-alto de acuerdo con el modelo de distribución. La figura 5-C, muestra las plantaciones de cítricos en una zona del municipio de Balancán que presentan un riesgo potencial alto. Los municipios de Centla, Jonuta y Nacajuca presentan una distribución potencial para el establecimiento de la enfermedad de muy baja a baja y considerando que Centla cuenta actualmente con 100 ha de cítricos establecidas, sería interesante evaluar los rendimientos que se obtienen en estas plantaciones y con los resultados, valorar la posibilidad de incentivar el crecimiento de estas zonas citrícolas del estado. Por su parte, Nacajuca aún no cuenta con plantaciones comerciales y Jonuta únicamente reportó el establecimiento de 5 ha de limón persa y naranja valenciana en el año 2019 (SIAP, 2019), lo que lleva a sugerir que deben conducirse estudios de idoneidad en el establecimiento de cítricos en esta zona, dado el bajo potencial que presentan para el establecimiento del HLB. El conocer las zonas de riesgo es fundamental en el entendimiento de la presencia de cualquier plaga o enfermedad (Díaz-Padilla *et al.*, 2014).

La mayoría de los modelos son dirigidos a la distribución del vector (Torres-Pacheco *et al.*, 2013). Sin embargo, este trabajo destaca la distribución de la enfermedad con puntos de presencia del patógeno generando resultados como los obtenidos por Ajene *et al.*, (2020) y Olvera-Vargas *et al.*, (2020) que demuestran el potencial e importancia de los modelos de distribución como herramienta para predecir el posible establecimiento de la enfermedad del HLB.

Conclusiones

El modelo de distribución potencial para el establecimiento de la enfermedad del huanglongbing en el estado de Tabasco generado a través de análisis geoespacial y modelación climática con el modelo de máxima entropía (MaxEnt), es una buena aproximación para la identificación de áreas con riesgo potencial de presentar *Candidatus Liberibacter*. Acorde con los valores obtenidos para el área de cobertura del modelo, se determinaron cuatro clases de distribución potencial de la enfermedad. El 7% del territorio que presenta una alta distribución potencial para HLB se concentra principalmente en los municipios de Huimanguillo y Balancán. La temperatura, humedad y tipos de suelo fueron los parámetros ambientales clave en el desarrollo del modelo de distribución de la especie. El uso de modelos de distribución de especies como herramienta facilita la vigilancia, planeación y manejo del territorio al precisar las zonas de vigilancia del patógeno y su vector, al tiempo que en conjunto con otros estudios define las zonas potenciales a incentivar para el crecimiento productivo de cítricos en el estado.

Capítulo 3. Metanálisis de la precisión en la detección de HLB por medio de percepción remota.

Meta-analysis of the precision in the detection of HLB by means of remote sensing

Abstract

Huanglongbing (HLB) is considered the most destructive for citrus in the world, so early detection is key to its control. The use of remote sensing techniques presents the opportunity to perform fast, effective, and low-cost detections in large areas. Objective of this work was to carry out a meta-analysis that evaluated the precision in the detection of HLB using remote sensing techniques, comparing the method, type of image, measurement equipment and wavelength used. A systematic search was carried out in electronic databases of journals. The effect of group accuracy was assessed using odds ratio and fixed-effect models in the MetaWin 2.1 program. Of these, bagged decision's method presented statistical significance with an effect size of 3.56. Of the measuring equipment, both the RGB-D Sensor and the spectrometer (ESP) show effect sizes of 3.28. On the other hand, multispectral images presented a greater effect with 2.21, while wavelength 591 registered an effect size of 3.53. The results show that, current remote sensing techniques can contribute significantly to the control of HLB. However, it is necessary to deepen the investigation of the application of these techniques, since most do not incorporate other variables such as crop stage and environmental conditions, among others.

Introduction

Huanglongbing (HLB) is a disease caused by several species of the genus *Candidatus Liberibacter* that obstruct the phloem, preventing the distribution of the sap, causing poor quality in the fruits (Mora-Aguilera *et al.*, 2014). This disease affects all citrus species, causing contaminated young plants to fail to produce and adult plants to become unproductive in a period of 2 to 5 years (Granados-Ramirez y Hernandez-Hernandez, 2018). HLB has no cure and due to the severe effects on the production of fruit and the speed with which it has caused the death of millions of plants in various parts of the world, it is considered the most destructive disease for citrus fruits (SADER, 2018).

The detection and diagnosis of HLB is the critical step for successful control (Garcia-Ruiz *et al.*, 2013). That is why in recent years the use of remote sensing techniques has increased in the analysis of the spectral behavior of the plants, since they allow characterizing and evaluating the nutritional and phytosanitary status of the plant to detect incidences of pests and diseases and infer possible nutritional deficiencies (Sá *et al.*, 1999). The success of these techniques is due to the fact that the phenological state of each plant species has a different spectral response (Qin y Zhang, 2005) and plants establish their biological processes thanks to the interactions they have with solar radiation in thermal aspects, photosynthetic, and photomorphological, presenting its own and different energy pattern, known as a spectral signature, which distinguishes it from the rest of the materials (Jiménez, 2013).

These rapid prospecting techniques to detect potentially HLB-infected plants offer the opportunity to monitor, inspect and control the spread of the disease in specific areas of the plantations (Garcia *et al.*, 2013). Some authors (Mirshra *et al.*, 2012; Sankaran y Ehsani, 2013), among others, have shown reliable results with the use of remote sensing for the early detection of HLB, although these results show great variability that could be due to the diversity in their combinations of methods, measurement equipment, wavelengths and type of image.

Due to the increase in these studies, it is necessary to know, through a systematic analysis or meta-analysis, the best way to achieve favorable results. Meta-analyses make it possible to study the efficacy and safety of one treatment compared to another with a high level of quality and scientific rigor (Hutton *et al.*, 2016). It is necessary to use technological methods and tools that allow efficient treatment of large volumes of data, turning them into strategic information (Orjuela-Garzón *et al.*, 2020). For this reason, the objective of this work was to carry out a meta-analysis on the precision of the image classification methods, types of images, wavelengths and measurement equipment that have been used for the detection of HLB by means of remote sensing. identifying the variables that presented a greater effect.

Materials and Methods

Data selection

A systematic review was first carried out in electronic databases such as Elsevier, SciELO, Dialnet, ResearchGate, Redalyc and Springer link to perform the precision analysis in the detection of HLB based on remote sensing. The search terms used were: Huanglongbing, remote sensing, remote sensing and spectroscopy, and their equivalent in English. Also, the citations of the works resulting from the aforementioned searches were included (Monsreal-Ceballos *et al.*, 2018). Subsequently, using the discard technique, the titles and abstracts of each article were examined, making a first selection. The following inclusion criteria were applied to the set of selected articles: 1) Studies with a time range from 2000 to 2019; 2) Studies with detection of HLB disease through remote sensing; 3) Studies that describe the methodology used for the detection of HLB; 4) Studies with information regarding any of the following data: spectral range, type of image, measurement equipment used for the detection of HLB; 5) Studies that provide the percentage of precision of the classification methods for the detection of HLB disease.

Data from the same article that showed more than one detection method and their combinations with the variables: measuring equipment, spectral range and type of image were considered as independent studies. The data obtained from the articles

that met the inclusion criteria constituted the baseline information for the meta-analysis.

Effect size

Four analysis groups were generated (classification methods, spectral range, measurement equipment, and image type). For each group, the effects of precision were evaluated using the odds ratio, which estimate the probability that an event occurs P1 between the probability that 1-P1 does not occur, in relation to one (Rosenberg *et al.*, 2002). Therefore, from each study, the percentage of precision in the positive detection of Huanglongbing as response to treatment was taken and divided by the percentage of non-occurrence of non-response to treatment. To calculate the variance of the effect size of the precision in the detection of HLB for each study, the following formula was used:

$$v_m = \frac{1}{A} + \frac{1}{B} + \frac{1}{C} + \frac{1}{D}$$

Data analysis

The analysis of the precision variable for the detection of Huanglongbing by means of remote sensing was carried out in the statistical program Meta Win 2.1 using fixed effect models (Rosenberg *et al.*, 2002). Confidence intervals were generated at a 95% confidence level (bootstrap with bias correction) for all effect sizes from 999 iterations. The effects were considered significant if the confidence intervals (CI) did not overlap with zero.

To assess whether the categorical groups (methods, measurement equipment, image type, and spectral range) were homogeneous with respect to effect size, heterogeneity within each group (QW) was calculated and significance was assessed by X^2 : When the The p value of the heterogeneity test is <0.05 , the results are heterogeneous and when the p value is ≥ 0.05 the test is not significant (Rivas-Ruiz *et al.*, 2014).

The risk of bias in the data set was assessed using the failsafe number (nfs), using the Rosenberg method (Rosenthal, 1979; Rosenberg, 2005). The nfs indicate the number of non-significant, unpublished or missing studies that should be added to the meta-analysis to change the results from significant to non-significant. The results are considered robust when the nfs is greater than $5n + 10$, where n is the number of studies (Rosenthal, 1979).

Results

The search strategy implemented in the metasearch engines and databases, led to the obtaining of a total of 43 articles published on the detection of Huanglongbing through remote sensing in citrus crops for the period 2000 to 2019. Once the inclusion criteria defined in the methodology were applied to the selected articles, a sensitivity of 30 was obtained and from there 178 studies were obtained from which the information on the classification methods, measurement equipment, and type of image was extracted and spectral range. 74% of the studies focused on the detection of HLB in orange crops (*Citrus sinensis*), less than 1% in lemon (*Citrus lemon*) and 25% of the studies did not specify the citrus species in which it was worked.

Regarding the temporality and spatiality of the studies selected for the meta-analysis, it should be noted that 78% of them were published between 2007 and 2013 and the studies were carried out in the state of Florida. After 2013, there is a significant decrease in the number of studies published on this subject.

Of the 178 studies analyzed, 21 classification methods were registered for evaluation in the meta-analysis, which obtained significant positive results on the precision in the detection of HLB with a mean effect size (E++) of 2.39 (95% CI = 2.24 to 2.57) (Figure 6). The highest effects were achieved by the Mahalanobis classification method, which obtained an effect size of 3.60 (95% CI = 3.22 to 3.98), followed by the Bagged Decision method whose presented value was 3.56 (95% CI = 3.47 to 3.63) and K-Nearest Neighbors that registered an effect size of 3.27 (95% CI = 2.74

to 3.63) (Table 3). The smallest effect size, reaching a value of 1.31 (95% CI = 0.29 to 2.45) (Figure 6; Table 3) was the Paralelepiped classification method.

Table 3. Classes included in the study group classification method

	Class	Studios	Qw	df	Media	CI
Methods	Bagged Decision	6	0.8	5	3.56	3.47, 3.63
	Naive-Bayes C.	6	31.48	5	2.44	1.95, 2.92
	NB	2	1.38	1	3.21	2.98, 3.45
	BDT	3	38.38	2	2.47	1.28, 3.74
	SIMCA	7	56.43	6	2.83	2.18, 3.38
	CVR y PLSR	2	1.68	1	3.18	2.92, 3.44
	Mahalanobis	3	10.85	2	3.6	3.22, 3.98
	S. Discriminant A.	10	45.4	9	2.18	1.79, 2.53
	K-Nearest Neighbors	6	22.34	5	3.27	2.74, 3.63
	Logistic Regression	2	20.14	1	2.56	1.67, 3.46
	Paralelepipedo	6	135.91	5	1.31	0.29, 2.45
	SFF	2	49.59	1	2.18	0.78, 3.59
	SID	6	175.46	5	1.84	0.62, 2.99
	MinDist	12	116.37	11	1.8	1.22, 2.23
	S. MahaDist	9	113.5	8	2.05	1.48, 2.74
	MTMF	8	84.94	7	1.89	1.25, 2.51
	LDA	11	92.09	10	1.98	1.44, 2.47
	QDA	18	110.74	17	2.42	2.06, 2.73
	SVM	17	191.9	16	2.55	2.07, 2.98
	SVM-Kernel	8	28.93	7	2.04	1.64, 2.40
SAM	12	175.07	11	1.95	1.35, 2.58	
	Total (95 % CI)	166	2303	165	2.39	2.24, 2.57

CI: Confidence interval; df = Degrees of freedom; Qw = Variation in effect size.

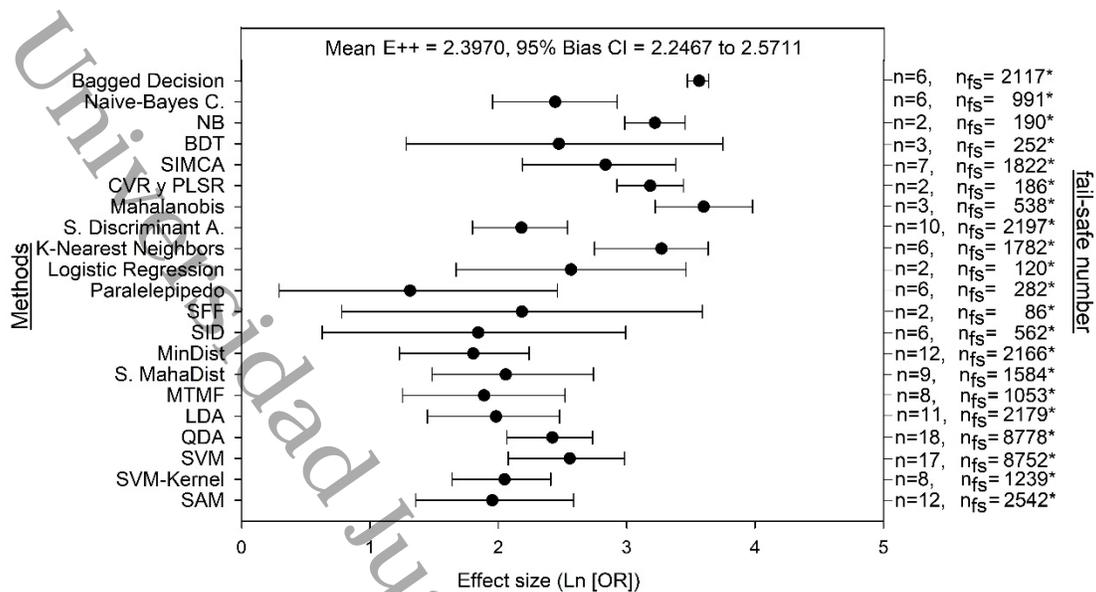


Figure 6. Effect size (mean and 95% confidence interval) of the precision of the methods in the detection of HLB. Effect sizes with confidence intervals that do not overlap with zero are considered significant. The number of studies used to calculate each mean is shown for each analysis. The * indicates statistical robustness of the nfs, effect size (E++) and 95% CI Bias is presented for all response variables.

In addition to the classification methods, other relevant elements in the acquisition of data for precision studies in the detection of HLB are, on the one hand, the technical and precision characteristics of the measurement equipment on data collection and, on the other, the transport in which the sensor is installed. Regarding the measurement equipment used for the acquisition of images, the 176 studies analyzed (2 did not report data) showed a good response in general and a total of twelve classes were obtained for evaluation.

The analysis of the effect in the categorical group “measuring equipment” resulted in a statistically representative precision for the detection of HLB in all the equipment used with a mean effect size (E++) of 2.43 (95% CI = 2.28 to 2.58) (Figure 7). However, the “SRC” (RGB-D Sensor, Two Grayscale Cameras) with an effect size of 3.28 (95% CI = 3.14 to 3.38) and the “ESP” (Spectrometer) with an effect size of 3.28 (CI 95% = 2.87 to 3.66) (Table 4), were the measurement equipment that produced the largest effect sizes on the precision in the detection of HLB (Figure 7). For its part, the “CHA” (airborne hyper-spectral camera) measurement equipment

was the one that achieved the smallest effect size, presenting a value of 0.89 (95% CI = 0.30 to 1.40) (Figure 7; Table 4).

Table 4. Classes included in the study group Measurement equipment

	Class	Studios	Qw	df	Media	CI
Measurement equipment	SRC	6	1.51	5	3.28	3.14, 3.38
	SPF	22	196.5	21	2.92	2.53, 3.22
	CMC	4	5.82	3	2.71	2.38, 3.11
	ESP	9	44.53	8	3.28	2.87, 3.66
	SOA	5	37.9	4	3.17	2.36, 3.66
	CHA	8	63.48	7	0.89	0.30, 1.40
	CMA	8	98.18	7	1.65	1.03, 2.44
	SWV	10	20.86	9	1.94	1.66, 2.16
	SCE	7	44.66	6	2.92	2.36, 3.42
	ESM	30	174.15	29	2.6	2.34, 2.83
	SCCD	51	1102	50	2.24	1.89, 2.60
	SCMO	16	27.88	15	2.15	1.97, 2.34
		Total (95 % CI)	176	2459.5	175	2.43

CI: Confidence interval; df = Degrees of freedom; Qw = Variation in effect size. SRC: RGB-D Sen-sor, two grayscale cameras; SPF: Portable fluorescence sensor; CMC: Multiband camera and thermal camera; ESP: Spectrometer; SOA: Active Optical Sensor; CHA: Airborne Hyperspectral Camera; CMA: Airborne Multispectral Camera; SWV: Satellite WorldView-2 (IL-2) WV-2; SCE: CCD sensor and imaging spectrograph; ESM: Spectroradiometer; SCCD: CCD sensor; SCMO: CMO Sensor.

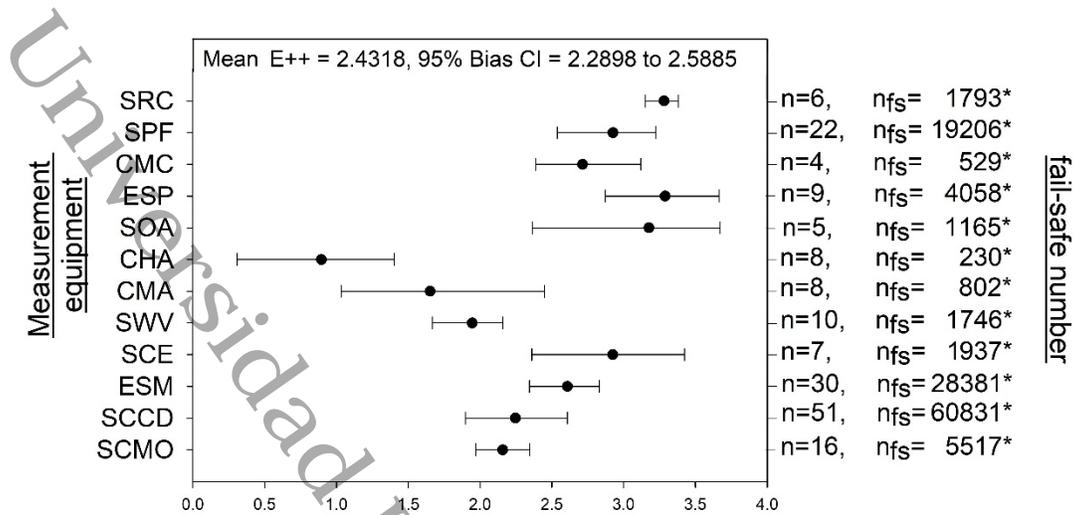


Figure 7. Effect size (mean and 95% confidence interval) of the precision of the measurement equipment in the detection of HLB. Effect sizes with confidence intervals that do not overlap with zero are considered significant. The number of studies used to calculate each mean is shown for each analysis. The * indicates statistical robustness of the nfs, effect size (E++) and 95% CI Bias is presented for all response variables. SRC: RGB-D sensor, two grayscale cameras; SPF: Portable Fluorescence Sensor; CMC: Multiband camera and thermal camera; ESP: Spectrometer; SOA: Active Optical Sensor; CHA: Airborne Hyperspectral Camera; CMA: Airborne Multispectral Camera; SWV: Satellite WorldView-2 (IL-2) WV-2; SCE: CCD sensor and imaging spectrograph; ESM: Spectroradiometer; SCCD: CCD sensor; SCMO: CMO Sensor.

Regarding the vehicle on which the sensor is located during the “transport used” image, it was not possible to include it in the meta-analysis because few studies reported this data. However, the data obtained indicate that unmanned aerial vehicles (UAVs), particularly those of the multirotor type, stand out with 46% of use in the studies. The single-engine fixed-wing aircraft ranks next with 30% of reports and ground vehicles were reported in 22% of the studies. The satellite refers to 2% of use.

The analysis on the categorical group "image type" was made up of two classes: multispectral images and hyperspectral images. The group presented significant positive results in the precision for the detection of HLB with a mean effect size (E++) of 2.05 (95% CI = 1.84 to 2.24) (Figure 8). Of the classes that make up this

categorical group, the multispectral images presented a greater effect size on the precision in the detection of HLB with a value of 2.21 (95% CI = 1.98 to 2.42) compared to the hyperspectral images that registered a size of effect of 1.92 (95% CI = 1.58 to 2.30) (Table 5), the latter being closer to zero (Figure 8).

Table 5. Classes encompassed in the Image Type study group

	Classes	Studios	Qw	df	Media	CI
Image type	Multiespectral	45	293.92	44	2.21	1.98, 2.42
	Hiperespectral	54	1176	53	1.92	1.57, 2.28
Total (95 % CI)		99	1495.3	98	2.05	1.84, 2.24

CI: Confidence interval; df = Degrees of freedom; Qw = Variation in effect size.

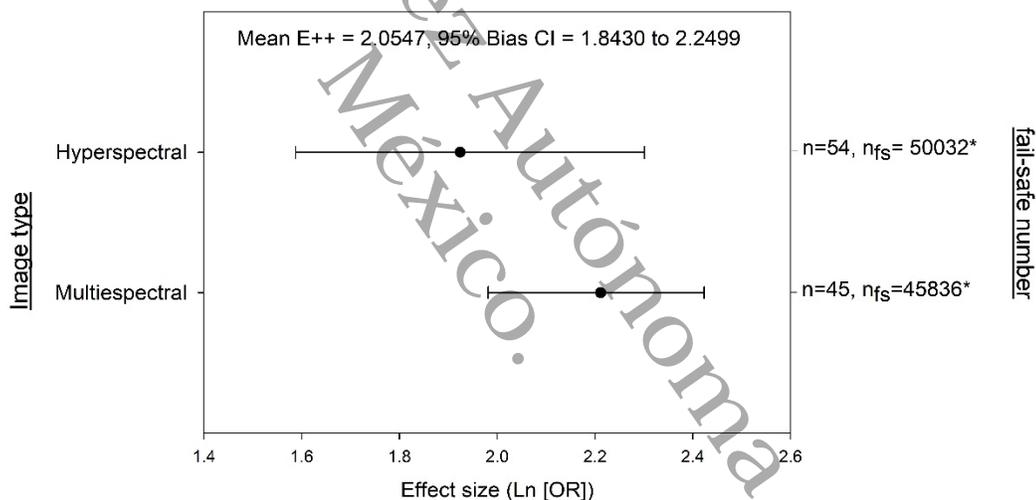


Figure 8. Effect size (mean and 95% confidence interval) of image type precision in the detection of HLB. Effect sizes with confidence intervals that do not overlap with zero are considered significant. The number of studies used to calculate each mean is shown for each analysis. The * indicates statistical robustness of the nfs, effect size (E++) and 95% CI Bias is presented for all response variables.

The last categorical analysis group was the one corresponding to the “spectral range”. In it, the different segments of the electromagnetic spectrum that were used to record information in the 178 studies analyzed were described and analyzed. Within this categorical group, 20 different wavelengths (classes) were identified. The

wavelength H (591) (Figure 9) was distinguished from the rest of the classes by presenting an effect size greater than the others with a value of 3.53 (95% CI = 3.04 to 3.82) (Table 6). Likewise, it was possible to observe that class N (397-995) was the only one that presented a minimal negative effect when obtaining an effect size of 0.97 (95% CI = -0.08 to 2.13) (Table 6). When observing the confidence interval (CI) in this class, it is distinguished that the size of the minimum effect is on the unit zero (Figure 9), so it is not statistically significant.

Table 6. Classes included in the Wavelength study group

	Classes	Studios	Qw	df	Media	CI
Wave length	A	12	79.66	11	3	2.58, 3.39
	B	10	114.79	9	2.83	2.07, 3.30
	C	4	13.85	3	2.62	2.18, 3.24
	D	4	32.05	3	2.4	1.71, 3.18
	E	4	5.82	3	2.71	2.38, 3.05
	F	4	33.65	3	3.32	2.36, 3.82
	G	2	1.68	1	3.18	2.92, 3.44
	H	5	13.19	4	3.53	3.04, 3.83
	I	5	37.9	4	3.17	2.36, 3.68
	J	8	12.64	7	1.99	1.72, 2.21
	K	2	6.72	1	1.72	1.20, 2.24
	L	15	301.14	14	1.84	1.21, 2.48
	M	14	211.7	13	2.27	1.68, 2.83
	N	7	196.15	6	0.97	-0.08, 2.13
	O	11	239.06	10	2.77	1.92, 3.52
	P	2	1.24	1	2.61	2.38, 2.83
	Q	8	24.26	7	3.17	2.79, 3.47
	R	4	3.86	3	1.76	1.51, 2.03
	S	4	4.21	3	2.26	2.00, 2.56
	T	13	52.53	12	1.59	1.28, 1.89
	Total (95 % CI)	169	2398.5	168	2.44	2.30, 2.61

Heterogeneity $X^2=0.00$ $p = > 0.05$

CI: Confidence interval; df = Degrees of freedom; Qw = Variation in effect size. A: 380-800; B: 375, 465, 520, 590, 635, 688, 750; C: 537, 713, 1546, 1597, 1746, 1898; D: 537, 612, 688, 713, 763, 998, 1066, 1120, 1148, 1296, 1472, 1597, 2121, 2172, 2348, 2493; E: 440, 480, 530, 560, 610, 660, 690, 710, 740, 810, 850, 900; F: 515-1072; G: 200-900; H: 591; I: 570, 670, 870, 970; J: 450-800; K: 450-510, 510-580, 630-690, 770-895, 400-450, 585-625,

705-745, 860-1040; L: 457-921; M: 450, 550, 650, 830; N: 397-995; O: 400-1000; P: 480, 560, 650, 830; Q: 350-2500; R: 710; S: 560, 710, 900; T: 530, 560, 660, 690, 710, 900.

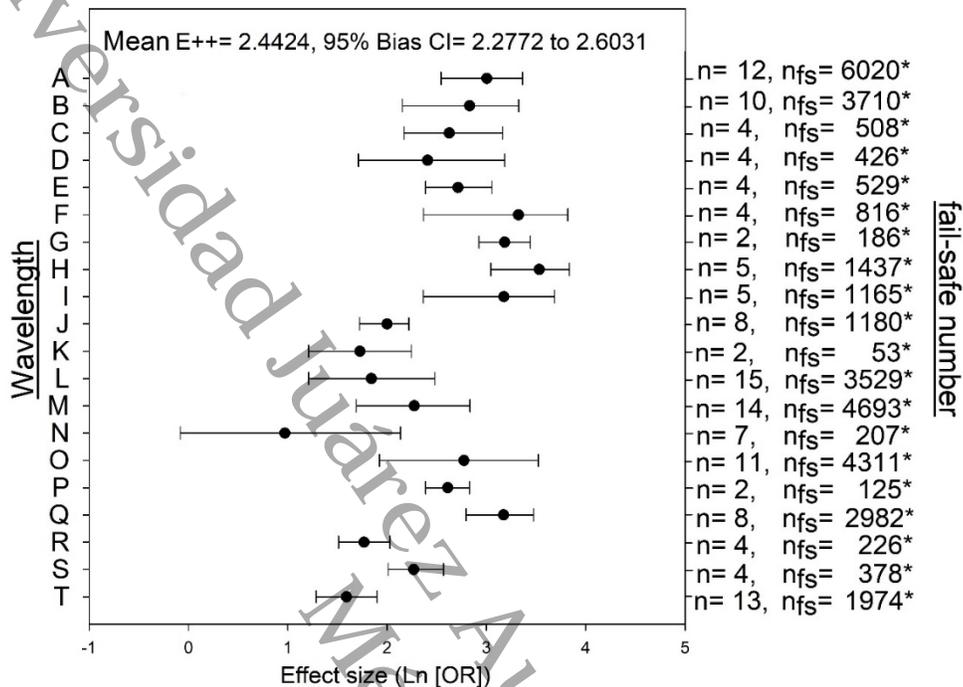


Figure 9. Effect size (mean and 95% confidence interval) of wavelength precision in detecting HLB. Effect sizes with confidence intervals that do not overlap with zero are significant. The number of studies used to calculate each mean is shown for each analysis. The * indicates statistical robustness of the nfs, effect size (E++) and 95% CI Bias is presented for all response variables. A: 380-800; B: 375, 465, 520, 590, 635, 688, 750; C: 537, 713, 1546, 1597, 1746, 1898; D: 537, 612, 688, 713, 763, 998, 1066, 1120, 1148, 1296, 1472, 1597, 2121, 2172, 2348, 2493; E: 440, 480, 530, 560, 610, 660, 690, 710, 740, 810, 850, 900; F: 515-1072; G: 200-900; H: 591; I: 570, 670, 870, 970; J: 450-800; K: 450-510, 510-580, 630-690, 770-895, 400-450, 585-625, 705-745, 860-1040; L: 457-921; M: 450, 550, 650, 830; N: 397-995; O: 400-1000; P: 480, 560, 650, 830; Q: 350-2500; R: 710; S: 560, 710, 900; T: 530, 560, 660, 690, 710, 900.

Lastly, the heterogeneity test (X^2) was performed with the Meta Win 2.1 package. This test showed positive results for all categorical groups with an X^2 of 0.00 and a value of $p \Rightarrow 0.05$ (Table 6), which indicates that the test is not significant, thus demonstrating that there is no heterogeneity within the groups. and allowing the combination of the results.

Discussion

As of the writing of this document, no meta-analyses have been found that study prediction in the detection of HLB by means of remote sensing. However, studies such as that of Rawat *et al.* (2015), to identify the sets of candidate probes in the interactions between citrus and HLB (Zolkos *et al.*, 2013), to estimate biomass by means of remote sensing with a Lidar sensor, allow us to note that this type of analysis is progressively important due to the growth in studies that deal with the same subject with variability in their results.

Of the 178 studies analyzed, approximately 80% were published in a single decade (2007 to 2013) and practically all (97%) were carried out in the state of Florida where orange production is concentrated in the United States. This increase coincides with the emergence of various alerts in the United States about the presence of the disease, which probably drove the development of applied research on the subject (ONPP, 2020; ONPP, 2020a).

The purpose of this research was to perform a meta-analysis on remote sensing-based HLB detection methods and in particular on four of the variables (classification methods, measurement equipment, types of images and spectral range) that have been used for this end. A fifth group (transport team) was initially considered, however, due to the scarcity of data, it was not possible to integrate it into the meta-analysis, although a descriptive analysis was made from the data collected. The results of the meta-analysis showed statistical significance in each group analyzed.

Classification method

Overall, the classification methods used were acceptable. However, the data analysis showed that, of the 21 classes registered in the categorical group, Mahalanobis and Bagged Decision are the best and have the highest probability to detect HLB as they present a greater effect and a smaller range of variation in their interval of confidence (3.60, 95% CI = 3.22 to 3.98 and 3.56, 95% CI = 3.47 to 3.63

respectively) (Table 3) thus providing greater precision and less variability respectively.

Among these two classes and based on the effect size presented, the method with the highest probability of detection of HLB in citrus fruit is Mahalanobis, since it is slightly higher than Bagged Decision. This coincides with what was provided by (Pourreza *et al.*, 2013), who used the Mahalanobis method to identify and distinguish in orange crops, healthy leaves from those deficient in Magnesium, obtaining a precision of 100%. A year later, they used the Mahalanobis method to classify Valencia and Hamlin orange data, obtaining reliable results above 95% (Pourreza *et al.*, 2014).

However, when the confidence intervals (CI) for the effect size are shorter, the variability is lower between studies (Catalan *et al.*, 2012). Under this consideration, among the methods that showed the best results in the present work, Bagged Decision is the one that provides results that are closest to the true size of the effect with a higher statistical significance. This suggests that this method is the one that can more accurately detect Huanglongbing disease in citrus.

A method with good precision should keep the number of false negatives to a minimum (plants classified as healthy when they are actually sick) (Sankaran y Ehsani, 2013). In the study carried out by these researchers, Bagged Decision presented a higher number of false negatives, reaching only 80% precision, compared to other methods such as "SVM" (Support Vector Machine), which obtained a precision of up to 87% with a minimum number of false negatives. For this reason, they do not consider Bagged Decision as the most accurate method, but it ranks second, which is consistent with the meta-analysis carried out, since it places Bagged Decision slightly below the Mahalanobis method (effects of 3.56 and 3.60 respectively) (Table 3), these being the two methods that present the highest precision for the detection of HLB.

On the other hand, this categorical group also shows that the Parallelepiped class was the one that was closest to zero, presenting an effect size of only 1.31 with a 95% CI = 0.29 to 2.45, followed by “SID” (Spectral Information Divergence) whose effect size was 1.84 and a 95% CI = 0.62 to 2.99 (Table 3). According to this result, Parallelepiped is the method that offers the lowest precision for detecting HLB disease and the second least accurate is SID, coinciding with that reported by Li *et al.* (2012), in a study on orange orchards (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) where the SID method presented the lowest precision (40.2%).

Some studies mention that the variation in the precision of the analyzed methods depends on the variables used (Zolkos *et al.*, 2013). In this way, it can then be affirmed that the determination of the most precise method to classify the images depends to a great extent on the criterion that is taken into consideration for this purpose and on the variables that are used.

Measurement equipment

The effect of 12 different measuring equipment was analyzed, from manual to others that are completely automated. Some of them carried by ground vehicles that carried out a static measurement and others airborne that carried out dynamic measurements at different speeds and heights. In general, all of them showed a good response, although the classes SRC and ESP obtained the best results in the meta-analysis.

According to the data analyzed, the most used equipments were “SCCD” (CCD Sensor), “ESM” (Spectroradiometer) and “SPF” (Portable Fluorescence Sensor) (Table 4). However, the results indicate that both the “SRC” (RGB-D Sensor) and “ESP” (Spectrometer) classes show the highest effect sizes with a mean of 3.28 (Figure 7, Table 4). This means that the RGB-D Sensor and the Spectrometer are, of the 12 classes analyzed, the measurement equipment that can detect HLB with the greatest probability but that were not the most used. In this sense, it should be noted that when analyzing the studies, it was observed that a greater number of

authors used “ESP” as a measuring device in their works (Vallejo *et al.*, 2016), who consider that the spectrometer could be applied as a rapid pre-diagnosis methodology, which has the advantage of being a noninvasive optical technique and is also easy to perform.

Now, it is important to note that, although these two classes (SRC and ESP) obtained an effect size with a mean of 3.28 and a CI of 95%, the differences between them are mainly presented in the variability that exists in their studies. The greatest differences lie in the values presented by the ESP class whose range of variability is greater than that of SRC (Table 4). This means that, although both measurement equipment have a good probability of detecting HLB, there is a greater consistency in the results achieved when using the RGB-D Sensor as measurement equipment. On the other hand, some authors (Mishra, *et al.*, 2011; ONPP, 2020) maintain that there is the possibility of improving the quality of response of the measurement equipment using some strategies to obtain data such as varying the angle of the shots or use different light sources, which would be very useful if it allows to improve the quality of the images. In this sense, it is important to point out that technological progress is currently vertiginous, so to date there are new equipment with greater capacity that could be more suitable in the field.

Image type

The image is a central element in the analysis of remote perception since it is the axis on which the detection is carried out, in this case of the disease. In the meta-analysis carried out, the categorical group “Image type” was made up of two classes: multispectral images and hyperspectral images. In it, multispectral images showed superiority over hyperspectral images by presenting the largest effect size with a value of 2.21, in addition to the fact that the confidence interval in their studies has less variability (95% CI = 1.98 to 2.42) (Figure 8, Table 5). This means that multispectral images are more accurate than hyperspectral in detecting HLB. In addition, by having less variability in their studies, they offer greater constancy reflected in a more precise estimate. Additionally, multispectral images are usually

an excellent technological option for the development of agricultural and forestry applications (Ponce-Corona, *et al.*, 2020) as they have high possibilities for the detection of pests and / or diseases (Sánchez-Méndez y Arguijo-Hernández, 2018).

This does not mean that hyperspectral imaging is not suitable for the detection of HLB. The results of the meta-analysis indicate that, according to the mean effect size (E++) whose value was 2.05 (95% CI = 1.84 to 2.24) (Figure 8) for both classes, both multispectral and hyperspectral images can be used. for the detection of HLB with good precision (Calderon *et al.*, 2014). In this sense, it would be expected that a greater segmentation of the electromagnetic spectrum could at a time define the identification of the HLB with greater precision. However, given that wavelength 591 presented the best results, it is possible to assert that for the particular case of this disease, multispectral images that consider this frequency are ideal for detection. Despite this, it is not advisable to rule out the use of hyperspectral images and even other segments of the spectrum since under different environmental conditions, the response may vary and with it the specific segment where to find the response to HLB.

On the other hand, hyperspectral images in the near future may become an indispensable element in the subject of agroforestry analysis. In fact, Pourreza (2013) affirms that the substitution of the multispectral analysis of five or six bands by the hyperspectral one, which has a greater supply of information, has already begun. Currently, the development of new sensors, as well as unmanned aerial vehicles and other high-end platforms and equipment with small size, can significantly improve results, as well as lower costs.

Spectral range

Pourreza (2013), report having used the Mahalanobis method and a wavelength of 591 in their study, resulting in 100% precision in the detection of HLB. This agrees with the results of the meta-analysis carried out, where the categorical group "Spectral range" shows that within the 20 classes analyzed, class "H" (591) is the

one that achieves a higher result than the others, by reaching a size effect of 3.53 (95% CI = 3.04 to 3.82) (Figure 9) (Table 6). This means that wavelength 591 belonging to class "H" is within the visible frequency range, which is where there is a greater potential for reflectance for HLB infected plants. In this sense, Sankaran (2013), state that the result of the evaluation of the spectral reflectance values of the visible and infrared bands carried out in trees infected with HLB, reflect more in the visible regions of the spectrum than in the near infrared regions compared to healthy trees.

Used Transport

This categorical group presented a low number of records in the studies analyzed, so it was not possible to incorporate it into the statistical analysis despite having been considered from the beginning of the work. However, it should be noted that the sensor transport platform is a factor of great relevance and must be considered, since elements such as sensor height, registration speed, vibration and pitch (Menéndez y Nuñez, 2009); together with other environmental factors (temperature, humidity, solar radiation, angle of incidence) present at the time of data collection and elements of the crop (age, species and phenological stage) have an important effect on the quality of the image, consequently constituting an important source of variation that affects the results of the measurement equipment.

The data collected shows that the vehicles most used for the detection of the HLB were the multicopter UAVs. It should be noted that UAVs (unmanned aerial vehicle) have increasingly accessible costs and greater availability of models with diverse characteristics in the market (Huang *et al.*, 2018 – Noor *et al.*, 2018), which allows to choose the equipment with the characteristics, components and costs that best meets the needs and conditions of the work to be carried out, as well as the economic resources available.

In contrast, the least used transport was the satellite (2%). In this regard, Ambrosio *et al.* (2009), argue that using this technology has a higher cost, so its use may become more restricted. However, in recent years, the commercial availability of high and medium resolution satellite images such as Landsat and Sentinel images has increased since they were released by NASA (National Aeronautics and Space Administration) and ESA. (European Space Agency) respectively, allowing free download. Consequently, availability and cost should not be a limitation for its use. A possible response to the low record of use of the satellite as transport for the sensor detected in this study can be indicated by Chuvieco (2006) who affirm that factors such as the angle of solar illumination depend on the time of year and the moment in which the satellite takes the data, as well as the angle of observation in relation to the satellite orbit and the characteristics of the sensor added to the environmental variations, the phenological state, among others, contain problems for the classification that could at the time be more difficult than the problem to be solved.

Finally, regarding the analysis of heterogeneity, an X^2 of 0.00 is observed for all groups with a value of $p \Rightarrow 0.05$ (Table 3), which indicates that the test is not significant. This means that the results do not present differences, that the studies are homogeneous and according to Rivas-Ruiz (2014), the studies are robust and consistent. Furthermore, as they are homogeneous, they can be reproduced with a high probability of obtaining significant precisions.

Conclusions

The results of this work are considered statistically significant. The variables with the highest statistical significance and the lowest variability in the confidence intervals were the "Bagged Decision" classification method, multispectral images and wavelength "591". Under the environmental conditions that the analyzed studies had, the multispectral images that consider a frequency of 591 are ideal for the detection of Huanglongbing disease.

SRC and ESP were the measurement equipment with the best results in the meta-analysis, although to date there are new equipment with greater capacity that could be more suitable in the field. The variables inherent to the transport platform together with environmental factors and specific elements of the crop present at the time of data collection contribute determining variations in the image quality and results obtained. It is essential to know and properly select the variables to be used to generate greater precision in HLB detection studies.

The remote perception analysis applied to the detection of HLB to generate greater precision in citrus fruit is a safe and affordable methodology to identify the state of plants at a regional scale, which facilitates early decision-making in the detection of diseases even when it still is asymptomatic and allows a sustainable management of production systems. The detection of HLB by remote sensing is feasible and has had great break-through especially in orange crops, despite the fact that, in the cultivation of lemon and other citrus, there is still an important area of opportunity.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

**Capítulo 4. Uso de imágenes satelitales para
identificación de parcelas de limón con presencia de
Huanglongbing**

Uso de imágenes satelitales para identificación de parcelas de limón con presencia de Huanglongbing

Resumen

El HLB es una enfermedad letal para los cultivos de cítricos, generando pérdidas en la industria de esta rama. Por ello, el objetivo de este trabajo es evaluar la viabilidad de las imágenes de mediana resolución en la detección del HLB en plantaciones de cítricos. Para lograrlo se utilizaron imágenes provenientes del satélite Landsat 8, también se aplicaron dos índices: a) Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y b) Índice de Clorofila (GCI). El procesado de las imágenes se realizó en la plataforma Google Earth Engine y el análisis de los datos se realizó mediante el programa QGIS 3.16. Los resultados indican que la banda azul (B) presentó diferencias estadísticamente significativas entre los grupos y mayor separabilidad entre las clases positivas y negativas. Para el análisis de los índices se utilizó la prueba T-Student, donde los resultados para las medias demostraron que no presentan diferencias estadísticamente significativas entre las parcelas positivas y negativas, el valor calculado en $t = 0.24$ y $p\text{-valor} = 0.8$. Los resultados de los análisis son moderados, siendo necesario estudios adicionales para confirmar el potencial de las imágenes de mediana resolución en la detección de la enfermedad del HLB.

Palabras clave: Landsat 8, HLB, detección, índices de vegetación y cítricos.

Introducción

Existe una continua amenaza hacia la seguridad alimentaria debido a las diversas plagas y enfermedades de los vegetales que causan pérdidas de entre el 20% y 40% de la producción mundial de alimentos (FAO, 2020) y en los últimos años la propagación de las plagas y enfermedades transfronterizas han aumentado drásticamente (FAO, 2021). Un ejemplo de ello, es el Huanglongbing (HLB), causado por bacterias del género *Candidatus liberibacter* que afecta principalmente a los cítricos y es considerada como la enfermedad más compleja, destructiva e incurable que genera grandes pérdidas a la industria citrícola (Deng *et al.*, 2020). (NAPPO, 2012; Gottwald *et al.*, 2007).

De acuerdo a la FAO (2013), esta enfermedad presenta una amplia distribución a lo largo de tres continentes, reportándose en 2004 en el continente americano con un avance rápido (Mara y Peyrou, 2010) pasando entre 2004 y 2005 de São Paulo (Brasil) a Florida (EE. UU), causando pérdidas de aproximadamente 100,000 acres de cítricos para este último (Alvarez *et al.*, 2016). En el continente americano se encuentra la especie asiaticus y es transmitida por el Psílido Asiático de los Cítricos (PAC) *Diaphorina citri Kuwayama* (Holguin *et al.*, 2012).

Los árboles afectados de cítricos agrios presentan hojas con puntos cloróticos, manchas angulares, acorchamiento y engrosamiento de nervaduras, moteado y clorosis difusa hasta el amarillamiento generalizado en la lámina foliar y defoliación (Flores *et al.*, 2015). Actualmente no existen variedades comerciales, porta injertos resistentes o métodos de control curativos para el HLB (Gonzales *et al.*, 2020), esto provoca que los árboles se vuelvan improductivos hasta que mueren (Granados-Ramírez y Hernández-Hernández, 2018). Para minimizar su problemática se desarrollan técnicas para su detección y diagnóstico, el cual de acuerdo a García *et al.* (2013), es el paso crítico para el éxito en su control.

Los métodos más utilizados para su detección son los análisis de campo, el método ELISA, PCR y PCR en tiempo real (Tatineni *et al.*, 2008). Sin embargo, los análisis de campo suelen ser subjetivos y con bajo porcentaje de precisión, además de requerir personal altamente capacitado. Por otra parte, los métodos bioquímicos son caros y los resultados suelen tardar (Pourreza *et al.*, 2013). Sin embargo, el uso de las técnicas de percepción remota ofrece métodos rápidos y fáciles para la detección de enfermedades de las plantas mejorando la productividad agrícola (Pourreza *et al.*, 2014), proporcionando cobertura a escalas de dosel y paisaje (Serrano *et al.*, 2020). Esto se logra debido a que las plantas presentan un patrón de energía propio y diferente, conocido como firma espectral, diferenciándolas del resto de los materiales (Jiménez, Jiménez y Fagua, 2012).

Estas técnicas han sido ampliamente consideradas en diversos estudios, como los trabajos realizados por Pourreza *et al.* (2014), Li (2013), Mirsha *et al.* (2013), Sarkar *et al.* (2016) entre otros, obteniendo precisiones mayores del 95% en la detección de HLB. Con base a sus resultados, las técnicas de percepción remota son una excelente opción para identificar árboles infectados por la bacteria *Candidatus Liberibacter*. No obstante, son escasos los estudios que han utilizado imágenes de mediana resolución como el caso del satélite Landsat en la detección de enfermedades, siendo esta una herramienta útil en el seguimiento fitosanitario (Blanco *et al.*, 2009). Es por ello, que este trabajo describe una metodología para la detección de la enfermedad del Huanglongbing, teniendo como objetivo evaluar la viabilidad de las imágenes de mediana resolución en esta área.

Materiales y métodos

El estudio se desarrolló en 36 parcelas de limón confirmadas como libres (Negativos) y 24 infectadas con HLB (Positivos) en el municipio de Huimanguillo, estos datos fueron tomados de los registros de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) del estado de Tabasco. El municipio de Huimanguillo cuenta con clima cálido húmedo con abundantes lluvias en verano, temperatura de 26.2°C y una precipitación de 2,290.3 mm anuales (INAFEB, 2017) y se debe considerar que el municipio es la principal zona citrícola del estado de Tabasco y la que presenta mayores reportes de HLB.

Debido a que los muestreos de campo se realizaron en 2014, se utilizó un mosaico anual con las imágenes del satélite Landsat 8 del sensor OLI (Operational Land Imager) que estuvieron disponibles para todo el año del muestreo. El compuesto se realizó con los valores medios de los píxeles de cada imagen, para finalmente realizar un stack con las bandas cuya resolución espacial fuera de 30 metros Azul (0.450 – 0.515 nm) (*B*), Verde (0.524 – 0.600) (*G*), Rojo (0.630 – 0.680) (*R*), Infrarrojo cercano (0.845 – 0.885) (*NEAR*), Infrarrojo de onda corta 1 (1.560 – 1.660) (*SWIR1*), Infrarrojo de onda corta 2 (2.100 – 2.300) (*SWIR2*). La obtención de la imagen fue realizada en la plataforma Google Earth Engine.

Una vez obtenida la imagen se calcularon las estadísticas resumen para cada banda espectral de acuerdo al conjunto de datos correspondiente (parcelas positivas o negativas). De las estadísticas de resumen se calculó para cada parcela el promedio, desviación estándar, valor máximo y valor mínimo de la reflectancia. Posteriormente se realizó la prueba t-Student como prueba estadística comparativa, donde se determina si dos medias presentan diferencias estadísticamente significativas, con el objetivo de conocer si se presenta una separabilidad en los valores de los grupos positivos (con HLB) y negativos (sanas). Esta misma prueba se realizó para los índices de vegetación permitiendo determinar si existían o no diferencias significativas entre los dos grupos analizados.

Los índices de vegetación han sido utilizados para estimar el estado de salud de cultivos a partir del vigor vegetal, contenido de clorofila entre otros (Revelo *et al.*, 2020). Es por ello, que en el software Qgis 3.16 se selecciono el índice de clorofila (GCI por sus siglas en ingles) debido a que este índice representa el estrés fisiológico de los árboles, para calcularlo se utiliza las bandas NEAR y G (ecuación 2). El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI por sus siglas en ingles), ya que es un mecanismo establecido que identifica pixeles de vegetación y se basa en el principio de que la clorofila del material vegetal absorbe fuertemente la luz visible y refleja la luz en el NIR (Li *et al.*, 2015) para obtener este indicador se utilizaron las bandas NIR y R (ecuación 1).

Las fórmulas de los índices para Landsat 8 son las siguientes:

$$NDVI = \frac{\text{Banda 5 (NEAR)} - \text{Banda 4 (R)}}{\text{Banda 5 (NEAR)} + \text{Banda 4 (R)}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$GCI = \frac{\text{Banda 5 (NEAR)}}{\text{Banda 3 (G)}} - 1 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Resultados y discusión

Las bandas del espectro visible muestran una distribución variante en los valores de la reflectancia espectral promedio (Figura 10). En las tres bandas los valores medios de las parcelas negativas fueron mayores con respecto de las parcelas positivas, sin embargo, la banda Azul (B) fue la única que presentó diferencias estadísticamente significativas entre los grupos (valor calculado en $t = 0.87$ y $p\text{-valor} = 0.38$), estos resultados coinciden con lo mencionado por Peña *et al.*, (2019) quienes mencionan que la luz es fuertemente absorbida en el espectro azul debido a los pigmentos fotosintéticos y otros pigmentos como los carotenoides y la clorofila. Normalmente las plantas sanas presentan picos de absorción en las longitudes de onda de alrededor de 420 nm (violeta) y 660 nm (rojo) y alta reflectancia en las

longitudes de onda verde (570), proporcionando el color característico de muchas plantas (Araque y Jimenez, 2009). Por otro lado, los procesos de reflectancia y absorbancia en las plantas enfermas se invierte, debido a la rápida degradación de la clorofila, mostrando un incremento de la reflectancia en las longitudes de onda roja al infrarrojo próximo (650 – 800 nm) y mayor absorción en las longitudes del azul y verde (410 – 630 nm) (Ranulfi, *et al.*, 2016).

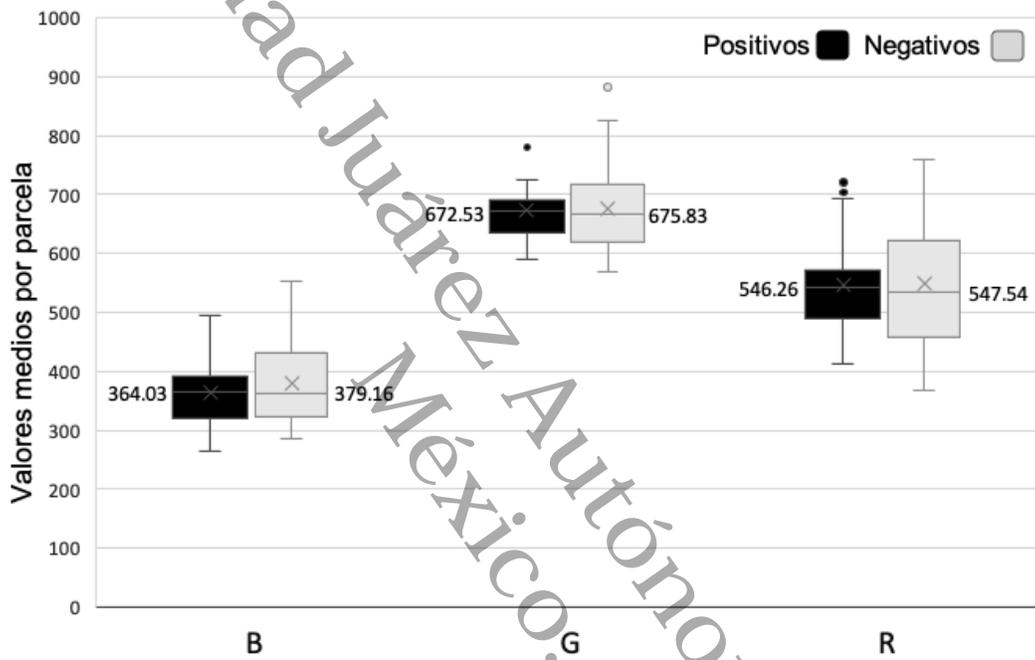


Figura 10. Resumen de las estadísticas de bandas espectrales individuales del espectro visible del satélite Landsat 8 calculados para las parcelas con categoría Positiva (con HLB) y Negativos (sanas).

Por otra parte, la banda del NEAR presenta una asimetría positiva en la clase de los negativos (sanos), con valores comprendidos entre 2662.44 y 3879.83. El valor medio fue de 3239.15 (desviación típica = 282.84). Presentado el mayor número de datos más cerca del primer cuartil (3058.97), mientras que la mayoría de las bandas presentan simetría en la distribución de sus datos.

Las bandas del infrarrojo han mostrado un gran potencial desde el comienzo de las tecnologías de percepción remota (Leataud *et al.*, 2017), las bandas de onda corta ayudan a diferenciar la humedad en la vegetación logrando detectar estrés en las plantas. En la figura 11. se puede observar que las bandas SWIR1 y SWIR2 presentan menor reflectancia espectral promedio en las parcelas con categoría de positivos (con HLB) que en las parcelas negativos (sanas). Viendo este mismo comportamiento en la figura 12. de Franklin (2001) donde las hojas enfermas presentaron una reducción de la reflectancia de longitudes de onda corta.

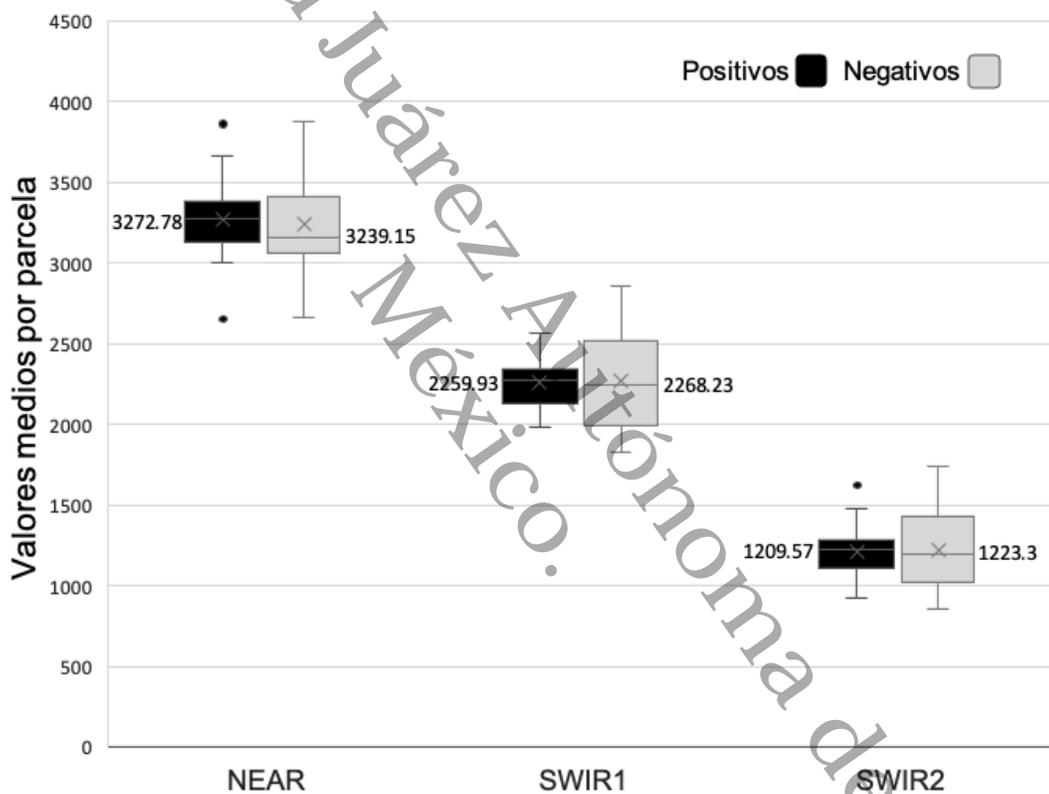


Figura 11. Resumen de las estadísticas de las bandas cinco, seis y siete del satélite Landsat 8 calculados para las parcelas con categoría Positiva (con HLB) y Negativos (sanas).

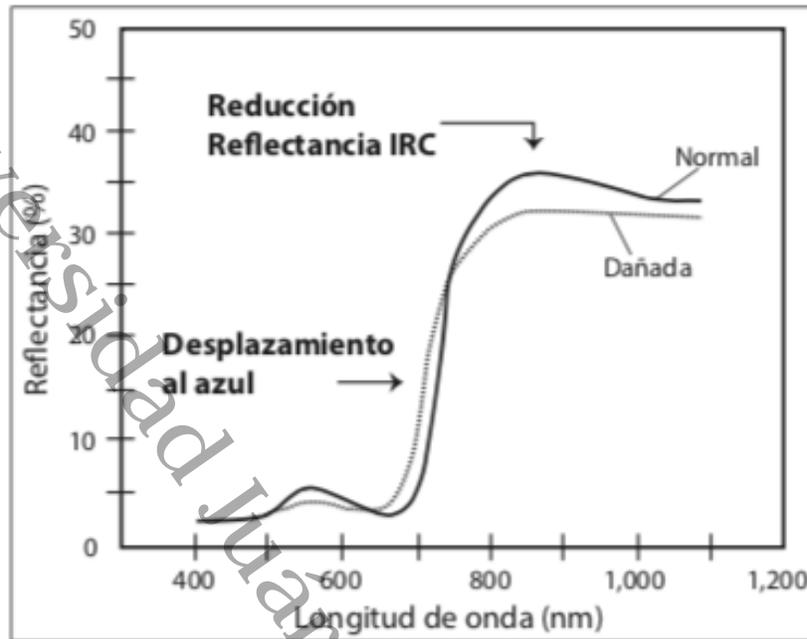


Figura 12. Respuesta espectral esperada de hojas enfermas  y sanas  tomado de Franklin (2001).

Del análisis estadístico se encontró que la banda azul (B) mostró separabilidad de clase siendo la única con significancia estadística. Por otro lado, las bandas SWIR1 y SWIR2 se pueden utilizar para futuros análisis ya que podrían indicar la presencia de estrés en la planta debido a la sintomatología de la enfermedad del HLB como la clorosis y el taponamiento de vasos enzimáticos que aumentan la temperatura de la planta.

Indices de vegetación

Para el análisis de este estudio se utilizaron una serie de imágenes que de acuerdo con Zhu y Liu (2014) son más precisos evitando los efectos temporales o estacionales en la evaluación de índices de vegetación como el NDVI, minimizando los errores de interpretación. Paz *et al.* (2014), mencionan que las bandas del Rojo e Infrarrojo cercano tienen la característica de ser contrarias en su saturación, por lo cual son usadas en forma conjunta para desmezclar las señales y definir índices

de vegetación óptimos. Además, se estima que los índices de vegetación representan la salud de las plantas (García *et al.*, 2013) la mayor reflectancia en el infrarrojo cercano indica una vegetación más densa y saludable. Para los resultados del estudio, se esperaba una separabilidad en las clases al momento de realizar el análisis de los índices NDVI y GCI; sin embargo, los resultados de la prueba t-Student para las medias demostró que no presentan diferencias estadísticamente significativas entre las parcelas positivas y negativas, el valor calculado en $t = 0.24$ y $p\text{-valor} = 0.81$. Mientras que los resultados de los mínimos y máximos muestran diferencias estadísticamente significativas para los dos grupos (Tabla 7 y 8).

Estos índices se pueden utilizar para obtener resultados sobre las variaciones de clorofila, carotenoides, agua y otros compuestos de forma inmediata y sin destruir las muestras. Un ejemplo de ello es el trabajo de Morillo *et al.*, (2018), donde el índice NDVI le permitió obtener resultados favorables sobre la concentración de clorofila a en su investigación, haciendo uso de imágenes Landsat 8.

Tabla 7. Prueba T-Student para índice NDVI calculados para las parcelas positivas (con HLB) y negativas (sanas).

	NEGATIVOS			POSITIVOS		
	Mínimos	Media	Máximos	Mínimos	Media	Máximos
MEDIA	0.62896	0.71034	0.7872	0.59528	0.71271	0.81129
VARIANZA	0.00701	0.00266	0.00189	0.005939	0.00211	0.0019
OBSERVACIONES	36	36	36	24	24	24
VARIANZA AGRUPADA	0.00658	0.00244	0.00189			
DIFERENCIA HIPOTÉTICA DE LAS MEDIAS	0	0	0			
GRADOS DE LIBERTAD	58	58	58			

ESTADÍSTICO T	1.57509	-0.1817	-2.10036
P(T<=T) UNA COLA	0.06034	0.42825	0.02003
VALOR CRÍTICO DE T (UNA COLA)	1.67155	1.67155	1.67155
P(T<=T) DOS COLAS	0.12067	0.85649	0.04006
VALOR CRÍTICO DE T (DOS COLAS)	2.00172	2.00172	2.00172

Tabla 8. Prueba t-Student para índice GCI calculados para las parcelas positivas (con HLB) y negativas (sanas).

	NEGATIVOS			POSITIVOS		
	Mínimos	Media	Máximos	Mínimos	Media	Máximos
MEDIA	3.05201	3.863	4.90756	2.81561	3.941	5.469802
VARIANZA	0.43817	0.2966	0.48588	0.28984	0.2	0.97535
OBSERVACIONES	36	36	36	24	24	24
VARIANZA AGRUPADA	0.37935	0.2583	0.67998			
DIFERENCIA HIPOTÉTICA DE LAS MEDIAS	0	0	0			
GRADOS DE LIBERTAD	58	58	58			
ESTADÍSTICO T	1.45654	-0.5808	-2.58737			
P(T<=T) UNA COLA	0.07532	0.2818	0.0061			
VALOR CRÍTICO DE T (UNA COLA)	1.67155	1.6716	1.67155			

P(T<=T) DOS COLAS	0.15064	0.5636	0.0122
VALOR CRÍTICO DE T (DOS COLAS)	2.00172	2.0017	2.00172

Conclusión

Se evaluó la viabilidad de las imágenes de mediana resolución Landsat 8 en la detección de la enfermedad del HLB, por que el uso de este tipo de productos representa una oportunidad para la detección de plagas y enfermedades, al contar con un elevado número de imágenes que pueden procesarse a lo largo del año (Blanco *et al.*, 2009); además, de ser económicas y accesibles.

La evaluación de las estadísticas resumen para las bandas espectrales indicó que las parcelas positivas (con HLB) tienen mayor reflectancia en la banda azul (B) en comparación con las parcelas negativas (sanas). Además, esta banda presentó diferencias estadísticamente significativas entre los grupos y mayor separabilidad entre las clases positivas y negativas. Por otro lado, las bandas de infrarrojo de onda corta (SWIR1 y SWIR2), presentaron menor reflectancia espectral promedio en parcelas positivas que en parcelas con categoría negativo; sin embargo, estas bandas no presentaron diferencias estadísticamente significativas.

En general, los resultados de los análisis son bastante moderados, siendo necesario estudios adicionales para confirmar el potencial de las imágenes de mediana resolución en la detección de la enfermedad del HLB.

Consideraciones finales

Es un hecho que mantener la seguridad alimentaria es fundamental para abastecer las necesidades diarias de la población actual, sin embargo las plagas y enfermedades se han convertido en una de las problemáticas más severas para cubrir la demanda de alimentos. Para ello la detección juega un papel fundamental evitando su proliferación.

Dentro de las técnicas de detección de plagas y enfermedades encontramos a la percepción remota, el cual es un método seguro y económico para identificar el estado de plantas incluso en estados asintomáticos. Como el caso del HLB que en sus primeras etapas no presenta ningún síntoma, encontrándose las técnicas de percepción remota como una excelente opción para identificar puntos clave y dar un manejo adecuado. Esto se debe por que en la región del espectro visible en la vegetación se caracteriza por baja reflectancia y transmitancia, dada la fuerte absorción por los pigmentos foliares, como la clorofila que absorbe la luz violeta-azul y roja por la fotosíntesis, reflejando la luz verde (Araque y Jimenez, 2009). Siendo la clorofila un bioindicador genérico del estado de salud, productividad, estrés y senescencia de las hojas y el dosel (Aguilar, 2018).

Los estudios sobre la variación espaciotemporal de la reflectancia, la radiación solar en las bandas del espectro visible, infrarrojo y los índices de vegetación constituyen enfoques importantes para dar una mirada desde lo geográfico a los problemas relacionados con la evaluación de riesgos de plagas y enfermedades, su incidencia, propagación y severidad, así como apoyo a las actividades de muestreo y seguimiento (Araque y Jimenez, 2009).

Es conclusión, los resultados de este trabajo permiten conocer las variables más utilizadas y con mayor precisión en la identificación de la enfermedad del HLB. Así mismo, se abona al conocimiento sobre la detección de plagas y enfermedades facilitando la toma de decisiones, así como el avance para futuros estudios.

Referencias

Aguilar, R.N. 2015. Percepción remota como herramienta de competitividad de la agricultura. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, Vol 6. Núm. 2. Pp. 399-405.

Ajene, I.J., Khamis, F., van Asch, B., Pietersen, G., Rasowo, B.A., Ekesi, S., y Mohammed, S. 2020. Habitat suitability and distribution potential of *Liberibacter* species (“*Candidatus Liberibacter asiaticus*” and “*Candidatus Liberibacter africanus*”) associated with citrus greening disease. *Diversity and Distributions*, Vol. 26, Núm. 5, Pp. 575–588. DOI <https://doi.org/10.1111/ddi.13051>.

Alemán, J., Baños, H. y Ravelo, J. 2007. *Diaphorina citri* y la enfermedad Huanglongbing: una combinación destructiva para la producción citrícola. *Revista Protección vegetal*. Vol 22. Núm. 3. Pp 154-165.

Alonso, C., Moreno, V. y Rodríguez, E. 1999. Determinación experimental de la firma espectral de la vegetación. Una sencilla práctica de introducción a la teledetección. En TELEDETECCIÓN. Avances y Aplicaciones. VIII Congreso Nacional de Teledetección. Albacete, España. Pp. 429-432.

Alvarez, S., Rohrig, E., Solís, D., y Thomas, M.H. 2016. Citrus greening disease (Huanglongbing) in Florida: Economic impact, management and the potential for biological control. *Agricultural Research*, Vol. 5, Núm. 2, Pp. 109-118.

Anderson, R.P., Lew, D. y Peterson, A.T. 2003. Evaluating predictive models of species distributions: criteria for selecting optimal models. *Ecological modelling*, Vol. 162, Núm. 3, Pp. 211–232. Available at: <http://www.bionica.info/Biblioteca/Anderson2003PredictiveModels.pdf> [Accessed 2 December 2020].

Araque, T.L. y Jiménez, A. 2009. Caracterización de firma espectral a partir de sensores remotos para el manejo de sanidad vegetal en el cultivo de palma de aceite. *Revista Palmas*, Vol. 30. Núm. 3. Pp. 63-79.

Ávila, C.R., Villavicencio, G.R. y Ruiz, C.J.A. 2014. Distribución potencial de *Pinus herrerae* Martínez en el occidente del estado de Jalisco, *Revista mexicana de ciencias forestales*, Vol. 5, Núm. 24, Pp. 92–109. Available at: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322014000400009 [Accessed 13 Jun 2020].

Bassanezi, R., Gottwald, R. 2009. Epidemiology of HLB and potential pathways for introduction. Taller internacional de plagas cuarentenarias de los cítricos. Villahermosa, Tabasco, México. 27-31 de julio.

Benito, B. y Peñas, J. 2007. Aplicación de modelos de distribución de especies a la conservación de la biodiversidad en el sureste de la Península Ibérica. *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, Núm. 7, Pp. 100–119. Available at: https://www.researchgate.net/publication/28186522_Aplicacion_de_modelos_de_distribucion_de_la_biodiversidad_en_el_sureste_de_la_Peninsula_Iberica [Accessed 13 Jun 2020].

Blanco, E., Bonet, J.A., y Eizaguirre, M. 2009. Using Landsat satellite imagery to detect small-size forest stands of *Pinus nigra* Arn. and *Pinus sylvestris* L. affected by Scolytidae. *Forest Systems*, Vol. 18, Vol. 3, Pp. 264-275.

Bové J.M. 2012. Huanglongbing and the future of citrus in Sao Paulo, State, Brazil. *Journal of Plant Pathology*. Edizione ETS Pisa. Vol. 94. Núm. 3. Pp. 465-467.

Butler, M.J.A.; Mouchot, M.C.; Barale, V. y LeBlanc C. 1990. Aplicación de la tecnología de percepción remota a las pesquerías marinas: manual introductorio. FAO Documento Técnico de Pesca. Núm. 295. Roma, FAO. 212 p. <http://www.fao.org/3/t0355s/T0355S00.HTM#toc>

Caamal, C.I., Fernández, V.G.P., Ascencio, F.J., Rodríguez, L.E.S. y García, J.G.R. 2014. Análisis de los costos de producción del limón persa en el municipio de Tlapacoyan, Veracruz. *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan*. Vol.2 Núm. 3. Pp.192-200.

Cabello-Pasini, A. y Macías-Carranza, V. 2011. Optical properties of grapevine leaves: reflectance, transmittance, absorptance and chlorophyll concentration. *Agrociencia*, Núm. 45, Pp. 943-957. <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v45n8/v45n8a7.pdf>

Calderon, M.R., Navas, C.J.A., Lucena, L.C. y Zarco-Tejada, P.J. 2014. High-resolution hyperspectral and thermal imagery acquired from UAV platforms for early detection of *Verticillium* wilt using fluorescence, temperature and narrow-band indices In: Bendig, J. Bareth, G. Eds. *Proceedings of the Workshop on UAV-based Remote Sensing Methods for Monitoring*. 2014; *Kölner Geographische Arbeiten*, 94. http://digital.csic.es/bitstream/10261/97239/4/Calderon_et_al_2013_KGA94.pdf

Camacho-Tapia, M., Rojas-Martínez, R.I., Rebollar-Alviter, Á., Aranda-Ocampo, S. y Suárez-Espinoza, J. 2016. Biological, ecological, epidemiological and management aspects of *Candidatus Liberibacter*. Revista Chapingo serie horticultura, Vol. 1, Núm. 22, Pp. 5-16. DOI <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2015.09.021>

Catalán, M., Galindo, M.P., Martín, J. y Leiva V. 2012. Métodos de integración de odds ratio basados en meta-análisis usando modelos de efectos fijos y aleatorios útiles en salud pública. Revista Colombiana de Estadística, Núm. 35. Pp. 205-222. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=89923144002>

Catuna, R.N. 1995. La percepción remota y el análisis del espacio geográfico. Cuadernos de geografía, Vol. 5. Núm. 2. Pp. 83-106.

CESVETAB, 2016. Programa de trabajo de la campaña contra Huanglongbing de los cítricos, a operar con recurso del componente de sanidad federalizado del incentivo de sanidad vegetal del programa de sanidad e inocuidad agroalimentaria 2016, en el estado de Tabasco. SAGARPA-SENASICA.

Chuvienco, S.E. 2006. Fundamentos de teledetección espacial, 3 ed.; RIALP, España.

Chuvienco, S.E. 2010. Teledetección ambiental. La observación de la tierra desde el espacio. Nueva edición actualizada. Edit. Ariel Ciencia. Pp. 590.

Cruz-Cárdenas, G., López-Mata, L., Villaseñor, J.L. y Ortiz, E. 2014. Potential species distribution modeling and the use of principal component analysis as predictor variables. Revista mexicana de biodiversidad, Vol. 85, Núm. 1, Pp.188-199. DOI <https://doi.org/10.7550/rmb.36723>.

Deng, X., Zhu, Z., Yang, J., Zheng, Z., Huang, Z., Yin, X., Wei, S. y Lan, Y. (2020). Detection of citrus huanglongbing based on multi-input neural network model of UAV hyperspectral remote sensing. *Remote Sensing*, 12(17), 2678. <https://doi.org/10.3390/rs12172678>

Díaz-Padilla, G., López-Arroyo, J.I., Sánchez-Cohen, I., Guajardo-Panes, R.A., Mora-Aguilera, G. y Quijano-Carranza, J.Á. 2014. Áreas de abundancia potencial en México del vector del huanglongbing, *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae). Revista mexicana de ciencias agrícolas, Vol. 5, Núm. 7, Pp.1137–1153. DOI:<http://doi.org/10.29312/remexca.v5i7.836>

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), 2004. Perspectivas a plazo medio de los productos básicos agrícolas. Proyecciones al año 2010. Roma. Pp. 95.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), 2015. Citrus fruit statistics. Market and policy analyses of raw materials, horticulture and tropical (RAMHOT) products team. Roma. Pp. 53.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), 2013. Citrus. Marco estratégico para la gestión regional del Huanglongbing en América latina y el Caribe. Santiago de Chile. Pp. 76.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), 2021. Plagas y enfermedades de las plantas. [online] Available at: [http://www.fao.org/emergencias/tipos-de-peligros-y-de-emergencias/plagas-y-enfermedades-de-las-plantas/es/?page=2&ipp=10&no_cache=1&tx_dynalist_pi1\[par\]=YToxOntzOjE6lkwiO3M6MToiMil7fQ==](http://www.fao.org/emergencias/tipos-de-peligros-y-de-emergencias/plagas-y-enfermedades-de-las-plantas/es/?page=2&ipp=10&no_cache=1&tx_dynalist_pi1[par]=YToxOntzOjE6lkwiO3M6MToiMil7fQ==)

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), 2020. Sanidad vegetal y seguridad alimentaria. [online] Available at: <http://www.fao.org/3/i7829es/I7829ES.pdf>

FAOSTAT, 2012. Producción de cultivos por municipios, datos al cierre 2012. [online] Available at: <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>

Fernando, R. y Bocco, G. 2003. Los sistemas de información geográfica y la percepción remota. Herramientas integradas para los planes de manejo en comunidades forestales. Revista Gaceta ecológica, Núm. 68. Pp.43-54.

Ferrarezi, R.S., Christopher, I.V., Urbaneja, A. y Machado, M.A. 2020. Unravelling Citrus Huanglongbing Disease. *Frontiers in plant science*. [online] (11). DOI <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.609655>

Flores-Sánchez, J.L., Mora-Aguilera, G., Loeza-Kuk, E., López-Arroyo, J.I., Dominguez-Monge, S., Acevedo-Sánchez, G. y Robles-García, P. 2015. Pérdidas de producción inducidas por *Candidatus Liberibacter Asiaticus* en Limón Persa en Yucatán, México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, Vol. 33, Núm. 2, Pp.195-210. Available at: <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-33092015000200195> [Accessed 11 Jun 2020].

Franklin, S.E. 2001. Remote sensing for sustainable forest management. CRC press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business. Edit. Lewis Publishers. Boca raton London New York Washington, D.C. Pp. 116.

Garcia-Ruiz, F., Sankaran, S., Maja, J.M., Lee, W.S., Rasmussen, J., y Ehsani, R. 2013. Comparison of two aerial imaging platforms for identification of Huanglongbing-infected citrus trees. Computers and Electronics in Agriculture, Núm. 91. Pp.106-115. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.12.002>

García, R.F., Sankaran, S., Mari, M.J., Suk, L.W., Ramussen, J. y Ehsani, R. 2013. Comparison of two aerial imaging platforms for identification of Huanglongbing-infected citrus trees. Revista: Computers and electronics in agricultura. Núm. 93. Pp. 106-115.

Garza-Saldaña, J.J., Varela-Fuentes S. y Gómez-Flores W. 2017. Métodos para la detección presuntiva de Huanglongbing (HLB) en cítricos. Revista Ciencia UAT. Biotecnología y ciencias agropecuarias. Vol. 2. Núm. 2. Pp. 93-104.

Gómez, V.E., Obregón, N.N y Rocha, A.D.F. 2013. Método de segmentación de nubes en imágenes satelitales. Tecnura, Vol. 17. Núm. 36. Pp. 96-110.

Gonzalez, S.L.R., Acosta, A.D.R., Pino, Q.C.D. y González, E.D.D. 2020. Comparación del método de reacción almidón-iodo con la amplificación por polimerasa y recombinasa para el diagnóstico del huanglongbing (HLB) de los cítricos. Investigación Agraria, Vol. 22, Núm. 2, Pp. 100-105.

Gottwald, T.R., Aubert, B. y Huang, K.L. 1991. International Organization of Citrus Virologists Conference Proceedings. Spatial pattern analysis of citrus greening in Shantou, China. [online] Pp. 421-427. Available <<https://escholarship.org/uc/item/9rz5x2kW>>. [Accessed 2 December 2020].

Gottwald, T.R., Da Graca, J.V. y Bassanezzi, R.B. 2007. Citrus Huanglongbing: The pathogen and its impact. Online. Plant Health Progress doi:10.1094/PHP-2007-0906-01- RV.

Granados-Ramírez, G.R. y Hernández-Hernández, R., 2018. Reconversión de cultivos como resultado de la presencia de huanglongbing en Colima, México. Vol. 3, Núm. 61E, Pp. 413-431. DOI <http://dx.doi.org/10.15359/rgac.61-3.21>

Gutierrez, N., 2014. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. HLB de los cítricos (Huanglongbing). [online] Available at: <<https://sader.jalisco.gob.mx/fomento-agricola-hotofruticola-e-inocuidad7570>> [Accessed 12 May 2021].

Hajivand, S., Thohirah, L.A., Kamaruzaman, S., y Siti, N. 2009. Differential reaction of citrus species in Malaysia to Huanglongbing (HLB) disease using grafting method. American Journal of Applied Sciences, Vol. 4, Núm. 1, Pp. 32-38.

Holguín, P.R.J., Hernández, M.L.G. y Zulueta, R.R. 2012. El huanglongbing: la tristeza de los cítricos. Revista: La ciencia y el hombre. Universidad Veracruzana. Vol. 25, Núm. 3. Pp. 5.

Huang, Y., Reddy, K. N., Fletcher, R. S. y Pennington, D. 2018. UAV Low-Altitude Remote Sensing for Precision Weed Management. Weed technology, Núm. 32, Pp. 2-6 <https://doi.org/10.1017/wet.2017.89>

Hutton, B., Catalá-López, F. y Moher, D. 2016. La extensión de la declaración PRISMA para revisiones sistemáticas que incorporan metaanálisis en red: PRISMA-NMA. Medicina clínica, Núm. 147, Pp. 262-266. <http://dx.doi.org/10.1016/j.medcli.2016.02.025>

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), 2017. Anuario estadístico y geográfico de Tabasco. México : INEGI. 2017. 440 p.

INIFAP Produce (Instituto Nacional de Investigaciones forestales, agrícolas y pecuarias), 2000. Tecnología para producir limón persa. Folleto. SAGARPA-FUNDACIÓN PRODUCE DE VERACRUZ A.C.-FUNDACIÓN PRODUCE TABASCO A.C.

INIFAP, (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias), 2013. Reporte anual. Ciencia y tecnología para la seguridad alimentaria y la prosperidad del campo mexicano. Publicación especial No. 11.

INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria), 2011. Plagas y enfermedades. HLB. Huanglongbing o ex greening. Fichas coleccionables. SELTA. Estación experimental de cultivos tropicales Yuto.

Jiménez, L.A.F., Jiménez, L.F.R. y Fagua P.E. 2012. Digital image processing of remote sensing products for precise agricultura applications. Revista colombiana de tecnologías de avanzada. Vol. 1. Núm. 21. Pp. 19-26.

Jiménez, L.A.F., Jiménez, L.F.R. y Fagua, P.E. 2013. Procesamiento digital de imágenes de sensores remotos para aplicaciones de agricultura de precisión. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA), Vol. 1, Núm. 19-26. DOI: <https://doi.org/10.24054/16927257.v21.n21.2013.291>

Jiménez, R.R., Palma, L.D.J., Zavala, C.J. y Bautista, Z.F. 2013. Clasificación y caracterización de suelos de Tabasco con base en el enfoque geomorfopedológico. Colegio de Postgraduados. H. Cárdenas. [online] Available at: <<https://1library.co/document/ozln892q-clasificacion-caracterizacion-suelos-tabasco-base-enfoque-geomorfopedologico.html>>[Accessed 13 May 2021].

Kreakie, B.J., Fan, Y. y Keitt, T.H. 2012. Enhanced Migratory Waterfow Distribution Modeling by Inclusion of Depth to Water Table Data. PLOS ONE, Vol. 7, Núm. 1, p.e30142. DOI <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0030142>.

Kumar, A., Lee, W.S., Ehsani, R.J., Albrigo, L.G., Yang, C. y Mangan, R.L. 2012. Citrus greening disease detection using aerial hyperspectral and multispectral imaging techniques. Journal of Applied Remote Sensing, Vol. 6. Núm. 1. Pp. 063542. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.6.063542>

Leautaud, V.P., y López-García, J. (2017). Detección de árboles dañados por plaga en bosques de Abies religiosa en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, mediante fotografías aéreas infrarroja. Investigaciones Geográficas (Mx), Núm. 92, Pp. 1-12. DOI: [dx.doi.org/10.14350/rig.50249](https://doi.org/10.14350/rig.50249)

Li, H., Lee, W. S., Wang, R., Ehsani, R., y Yang, C. 2012. Spectral angle mapper (SAM) based citrus greening disease detection using airborne hyperspectral imaging. In Proc. 11th Intl Conf. on Precision Agriculture. Monticello, Ill.: International Society of Precision Agriculture.

Li, H., Lee, W.S., y Wang, K. 2013. Airborne hyperspectral imaging based citrus greening disease detection using different dimension reduction methods. In 2013 Kansas City, Missouri, July 21-July 24, 2013 (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.

Li, X., Lee, W.S., Li, M., Ehsani, R., Mishra, A.R., Yang, C., y Mangan, R.L. 2015. Feasibility study on Huanglongbing (citrus greening) detection based on WorldView-2 satellite imagery. Biosystems engineering, Núm. 132, Pp. 28-38. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.01.009>

Lira, J. 1995. La percepción remota: Nuestros ojos desde el espacio. Fondo de Cultura Económica. México. Edit. Ilse. Pp. 105.

Luis, P.M., Hernández, R.L., Collazo, C.C., Peña, B.I., Zamora, R.V., López, H.D., Llauger, R.R. y Batista, Le R.L. 2014. Diagnóstico y caracterización de la

enfermedad Huanglongbing de los cítricos para el establecimiento de su manejo en Cuba. Instituto de investigaciones en fruticultura tropical. La Habana. Presentación de la propuesta a premio de la academia de ciencias de Cuba. Pp. 154.

Madriz, O.K. 2002. Mecanismos de defensa en las interacciones planta-patógeno. Manejo integrado de plagas (Costa Rica), Núm. 63. Pp. 22-32. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/6562>

Magdaleno, M.F. y Martínez R.R. 2006. Aplicaciones de la teledetección láser (LIDAR) en la caracterización y gestión del medio fluvial. Ingeniería Civil, Núm. 142. Pp. 1-15.

Manzanilla-Ramírez, M.Á., Villegas-Monter, Á., Velázquez-Monreal, J.J., Zavaleta-Mancera, H.A., Sandoval-Villa, M., y Muñoz-Orozco, A. 2019. Cambios fisiológicos en árboles de limón mexicano en producción infectados con HLB. Revista mexicana de ciencias agrícolas, Vol. 10, Núm. 7, Pp. 1603-1614.

Mara H. y Peyrou M. 2010. La citricultura de Argentina y Uruguay puede escapar a la amenaza del HLB. Informe ejecutivo de consultoría. Departamento de biología molecular. Pp. 28.

Mara, H. y Peyrou, M. 2010. La citricultura de argentina y uruguay puede escapar a la amenaza del HLB. [online] Available at: https://www.fecier.org.ar/public/noticias/825_la-citricultura-de-argentina-y-uruguay-puede-escapar-a-la-amenaza-del-hlb.html [Accessed 13 Jun 2020].

Martínez, M.J. y Díaz, P.A. 2005. Percepción remota: Fundamentos de teledetección espacial. Comisión Nacional del Agua.

Matos, L., Hilf, M.E., y Camejo, J. 2009. First report of "*Candidatus Liberibacter asiaticus*" Associated with citrus Huanglongbing in the Dominican Republic. Plant disease. Vol. 93. Núm. 6. Pp. 668.

Menéndez, M.A. y Nuñez, V. 2009. El uso de los sensores remotos en los Recursos Naturales. Primera parte: La fotografía aérea y la fotointerpretación. Primera parte, 1ed.; 2009 Instituto de Recursos Naturales Y Ecodesarrollo (IRNED), Salta, Argentina <https://core.ac.uk/download/pdf/55304112.pdf>

Mishra, A., Karimi, D., Ehsani, R., y Gene A.L. 2011. Evaluation of an active optical sensor for detection of Huanglongbing (HLB) disease. Biosystems engineering, Núm. 110. Pp. 302-209. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.09.003>

Mishra, A.R., Karimi, D., Ehsani, R., y Lee, W.S. 2012. Identification of citrus greening (HLB) using a VIS-NIR spectroscopy technique. Transactions of the ASABE, Vol. 55, Núm. 2, Pp. 711-720. doi: 10.13031/2013.41369

Molina-Serrano, J.A., Fajardo-Franco, M.L., Aguilar-Tlatelpa, M., y Castañeda-Mendoza, A. 2020. Monitoreo de la severidad de *Lophodermium sp.* en bosque de pino con imágenes satelitales Sentinel 2. Revista mexicana de fitopatología, Vol. 38, Núm. 1, Pp.107-118.

Monsreal-Ceballos, R.J., Ruiz-Sánchez, E., Ballina-Gómez, H.S., Reyes-Ramírez, A. y González-Moreno, A. 2018. Effects of botanical insecticides on hymenopteran parasitoids: a meta-analysis approach. Neotropical entomology, Núm. 47, Pp. 681-688. <https://doi.org/10.1080/14786410802346223>

Mora-Aguilera, G., Robles-García, P., López-Arroyo, J.I., Flores-Sánchez, J., Acevedo-Sánchez, G., Domínguez-Monge, S., Gutierrez-Espinosa, A., Loeza-Kuk, E. y González-Gómez, R. 2014. Situación actual y perspectivas del manejo del HLB de los cítricos. Revista mexicana de fitopatología, Núm. 32, Vol. 2, Pp. 108–119. Available at:<http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-33092014000200108> [Accessed 11 Jun 2020].

Morillo, G., Villasmil, G.J.A., Pineda, A., y Orozco, G.R. 2018. Estimación de clorofila "a" en el Lago de Maracaibo, Venezuela utilizando imágenes LANDSAT 8. Mapping, Núm. 188, Pp. 4-14.

NAPPO (North American Plant Protection Organization), 2012. Protocolos de diagnóstico de la NAPPO. PD 02. Huanglongbing de los cítricos. México-USA-Canadá. Pp. 11.

Narouei-Khandan, H.A., Halbert, S.E., Worner, S.P., y van Bruggen, A.H.C. 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, Vol. 144, Núm. 3, Pp. 655–670. DOI <https://doi.org/10.1007/s10658-015-0804-7>.

Noor, N. M., Abdullah, A. y Hashim, M. 2018. Remote sensing UAV/drones and its applications for urban areas: a review. IOP Conf. Ser.: Earth Environ, Núm. 169, Pp. 1-6 doi :10.1088/1755-1315/169/1/012003

Olvera-Vargas, L.A., Quiroz, G.A.J., Contreras-Medina, D.I. y Aguilar-Rivera, N. 2020. Potential risk analysis of Huanglongbing through geospatial technology in Colombia. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, Vol. 21, Núm. 3, e1552. https://doi.org/10.21930/rcta.vol21_num3_art:1552

ONPP (Organización Norteamericana de Protección a las Plantas), 2020. Decreto federal para la cuarentena nacional de citrus greening o (Huanglongbing), *Candidatus Liberibacter asiaticus*. Available on line: <https://www.pestalerts.org/es/official-pest-report/decreto-federal-para-la-cuarentena-nacional-de-citrus-greening-o-huanglongbing>(accessed on 25/nov/2020)

ONPP (Organización Norteamericana de Protección a las Plantas), 2020a. Estatus del huanglongbing o enverdecimiento de los cítricos (*Candidatus Liberibacter asiaticus*) en Estados Unidos Available on line:<https://www.pestalerts.org/es/official-pest-report/estatus-del-huanglongbing-o-enverdecimiento-de-los-c-tricos-candidatus>(accessed on 25/nov/2020)

Orjuela-Garzón, W.A., Araque, E.W.A. y Cabrera, P.R. 2020. Identificación de tecnologías y métodos para la detección temprana del huanglongbing (HLB) a través de cienciometría en artículos científicos y patentes. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, Núm. 21, p. 24 <https://doi.org/10.21930/rcta.vol1num2art:1208>

Palma-Ordaz, S. y Delgadillo-Rodríguez, J. 2014. Distribución potencial de ocho especies exóticas de carácter invasor en el estado de Baja California, México. *Botanical Sciences*, Vol. 92, Núm. 4, Pp. 587–597. DOI: <https://doi.org/10.17129/botsoci.135>

Palomo, J.L., Siverio, F., y Jaime, C. 2017. *Candidatus Liberibacter*: agentes causales de enfermedades importantes en cultivos de interés en España. *Fitopatología*, Pp. 15–22. Available at: https://www.researchgate.net/publication/323178654_Candidatus_agentes_causales_de_interes_en_Espana [Accessed 11 Jun 2020].

Paz, P.F., Romero, S.M.E., Palacios, V.E., Bolaños, G.M., Valdez, L.J.R., y Aldrete, A. 2014. Alcances y limitaciones de los índices espectrales de la vegetación: marco teórico. *Terra Latinoamericana*, Vol. 32, Núm. 3, Pp. 177-194.

Peña, L., Rentería, V., Velásquez, C., Ojeda, M.L., y Barrera, E. 2019. Absorbancia y reflectancia de hojas de *Ficus* contaminadas con nanopartículas de plata. *Revista mexicana de física*, Vol. 65, Núm. 1, Pp. 95-105.

Peterson, A.T., Sánchez-Cordero, V., Beard, C.B. y Ramsey, J.M. 2002. Ecologic niche modeling y potential reservoirs for Chagas disease, Mexico. *Emerging infectious diseases*. Vol. 8, Núm. 7, Pp. 662. DOI <https://doi.org/10.3201/eid0807.010454>

Peterson, A.T., Soberón, J., Pearson, R.G., Anderson, R.P., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M. y Araújo, M.B. 2011. *Ecological niches and geographic distributions (MPB-49)*. [online] Princeton University Press. Available at: <<https://press-princeton.edu/books/paperback/9780691136882/ecological-niches-and-geographic-distributions-mpb-49>> [Accessed 17 November 2020].

Phillips, S.J., Anderson, R.P. y Schapire, R.E. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological modelling*, Vol. 190, Núm. 3–4, Pp. 231–259. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jcz.2015.08.002>.

Ponce-Corona, E., Sánchez, M.G., Fajardo-Delgado, D., Acevedo-Juárez, B., De-la-Torre, M., Avila-George, H. y Castro, W. 2020. Una revisión sistemática de la literatura enfocada al uso de vehículos aéreos no tripulados durante el proceso de detección de vegetación. *RISTI-Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*. Núm. 36, Pp. 82-101. DOI: [10.17013/risti.36.82-101](https://doi.org/10.17013/risti.36.82-101)

Pourreza, A., Lee, W.S.D., Raveh, E., Ehsani, E. y Etxeberria E. 2014. Citrus Huanglongbing detection using narrow-band imaging and polarized illumination. *Transactions of the ASABE. American Society of Agricultural and Biological Engineers*, Núm. 57, Pp. 259-272. doi: [10.13031/trans.57.10147](https://doi.org/10.13031/trans.57.10147)

Pourreza, A., Lee, W.S.D., Raveh, E., Ehsani, E. y Etxeberria E. 2014. Citrus Huanglongbing detection using narrow-band imaging and polarized illumination. *Transactions of the ASABE. American Society of Agricultural and Biological Engineers*, Núm. 57. Pp. 259-272. doi: [10.13031/trans.57.10147](https://doi.org/10.13031/trans.57.10147)

Pourreza, A., Lee, W.S.D., Raveh, E., Hong, Y. y Kim, H.J. 2013. Identification of citrus greening disease using a visible band image analysis. In *ASABE anual international meeting. American Society of Agricultural and Biological Engineers, Kansas City, Missouri* [@2013](http://dx.doi.org/10.13031/aim.20131591910)

Pourreza, A., Lee, W.S.D., Raveh, E., Hong, Y. y Kim, H.J. 2013. Identification of citrus greening disease using a visible band image analysis. In *ASABE anual international meeting. American Society of Agricultural and Biological Engineers, Kansas City, Missouri* [@2013](http://dx.doi.org/10.13031/aim.20131591910)

Qin Z. y Zhang M. 2005. Detection of rice sheath blight for in-season disease management using multispectral remote sensing. Revista: International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Núm. 7. Pp. 115-128.

Qin, Z. y Zhang, M. 2005. Detection of rice sheath blight for in-season disease management using multispectral remote sensing. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. Núm. 7. Pp. 115-128. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2005.03.004>

Ramos, M.C. 2008. Huanglongbing ("*citrus greening*") y el psílido asiático de los cítricos, una perspectiva de su situación actual. Portal Agrosanitario, Núm. 5, P. 10. Available at: <https://swfrec.ifas.ufl.edu/hlb/database/pdf/21_Ramos_08.pdf> [Accessed 14 August 2020].

Ranulfi, A.C., Cardinali, M.C.B., Kubota, T.M.K., Freitas-Astua, J., Ferreira, E.J., Bellete, B.S., da Silva, M.F.G.F., Villas, B.P.R., Magalhaes, A.B. y Milori, D.M.B.P. 2016. Laser-induced fluorescence spectroscopy applied to early diagnosis of citrus Huanglongbing. biosystems engineering, Núm. 144, P.p. 133-144. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.02.010>

Revelo, L.D., Mejía, M.J., Montoya-Bonilla, B.P., y Hoyos G.J. 2020. Análisis de los índices de vegetación NDVI, GNDVI y NDRE para la caracterización del cultivo de café (*Coffea arabica*). Ingeniería y Desarrollo, Vol. 38, Núm. 2, Pp. 298-312.

Rivas-Ruiz, R., Castelán-Martínez, O.D., Pérez-Rodríguez, M., Palacios-Cruz, L., Noyola-Castillo, M.E. y Talavera, J.O. 2014. Investigación clínica XXIII: Del juicio clínico a los metaanálisis. Revista Médica del Instituto Mexicano del Seguro Social, Núm. 52, Pp. 558-565. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7274139/>

Robles G.M., Velázquez M.J.J., Manzanilla R.M.A., Orozco S.M., Flores V.R. y Medina U.V.M. 2011. El HLB en árboles de limón mexicano (*citrus aurantifolia* (christm) swingle) su dispersión y síntomas en Colima, México. Segundo Simposio Nacional sobre investigación para el manejo del psílido asiático de los cítricos y el huanglongbing en México. Diciembre 2011. Montecillo. México.

Robles, G.P. y Delgadillo, V.I. 2010. Protocolo de actuación para la detección del Huanglongbing. Dirección de protección fitosanitaria. SAGARPA-SENASICA. Pp. 38.

Rosenberg, M.S. 2005. The file drawer problem revisited: a general weighted method for calculating fail-safe numbers in meta-analysis. *Evolution*, Núm. 59, Pp. 464-468. <https://doi.org/10.1111/j.0014-3820.2005.tb01004.x>

Rosenberg, M.S., Adams, D.C. y Gurevitch, J. 2002. *MetaWin: Statistical Software for Meta-Analysis*. Version 2.0. Sinauer Associates.

Rosenthal, R. 1979. The file drawer problem and tolerance for null results. *Psychological bulletin*, Núm. 86, Pp. 638-641. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.86.3.638>

Rullán, S.C.D. 2015. *Aplicación de la teledetección satelital en el seguimiento de la defoliación por insectos forestales*. Tesis doctoral. Universidad de Valladolid. Instituto universitario de investigación en gestión forestal sostenible. Palencia. Pp. 142.

Sá, I.B., Antonio, R. y Almorox, J.A. 1999. Aplicación de sensores remotos en la detección y evaluación de plagas y enfermedades en la vegetación. In VIII Congreso Nacional de Teledetección, Albacete, España. Pp. 64-67. <http://dns2.aet.org.es/congresos/viii/alb16.pdf>

SADER, (Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural) 2018. Producción de cítricos en Tabasco. Limón, fuente de ingreso en municipios de Tabasco. [online] Available at: <https://www.gob.mx/sader/tabasco/articulos/produccion-de-citricos-en-tabasco?idiom=es> [Accessed 16 November 2020].

SAGARPA (Secretaria de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación), 2011. Indicadores estatales agroeconómicos. Subsecretaria de fomento a los agronegocios. Tabasco. Pp. 6.

SAGARPA (Secretaria de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación), 2013. Programa de Prevención y Manejo de Riesgos Componente Sanidades Evaluación Estatal del Funcionamiento y la Operación 2012, en el Estado de Tabasco. Pp. 86

SAGARPA (Secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación), 2015. Márgenes de comercialización. Limón persa. Boletín. SIAP-SAGARPA. Pp. 4

SAGARPA (Secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación), 2010. Acuerdo por el que se dan a conocer las medidas fitosanitarias

que deberán aplicarse para el control del Huanglongbing (*Candidatus liberibacter spp.*) y su vector. Diario oficial. Pp. 13.

SAGARPA-SENASICA, Colaborador: Mora A., G. 2013. Ficha técnica HLB (Huanglongbing). Dirección de sanidad vegetal-Colegio de Postgraduados.

Sánchez-Méndez, A.G. y Arguijo-Hernández, S.P. 2018. Análisis de imágenes multiespectrales para la detección de cultivos y detección de plagas y enfermedades en la producción de café. Research in Computing Science, Núm. 147, Pp. 309-317. https://www.cicling.org/micai/rcs-local/2018_147_7/Analisis%20de%20imagenes%20multiespectrales%20para%20a%20deteccion%20de%20cultivos%20y%20deteccion%20de%20plagas.pdf

Sankaran, S. y Ehsani R. 2013. Detection of Huanglongbing-infected citrus leaves using statistical models with a fluorescence sensor. Applied spectroscopy, Vol. 67, Núm. 463-469. <https://doi.org/10.1366/12-06790>

Sankaran, S. y Ehsani, R. 2011. Visible-near infrared spectroscopy based citrus greening detection: Evaluation of spectral feature extraction techniques. Crop Protection. Núm. 30, Pp.1508-1513. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2011.07.005>

Sankaran, S., y Ehsani, R. 2012. Detection of huanglongbing disease in citrus using fluorescence spectroscopy. Transactions of the ASABE, Vol. 55, Núm. 1, Pp. 313-320.

Santivañez, T., Mora, A.G., Díaz Padilla, G., Lopez Arrollo, J.I. y Vernal Hurtado, P. 2013. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la agricultura. Citrus: Marco estratégico para la gestión regional del Huanglongbing en América Latina y el Caribe. [online]. Available at:<https://www.researchgate.net/publication/275640678_Citrus_Marco_Estrategico_para_la_Gestin_Regional_del_Huanglongbing_en_America_Latina_y_el_Caribe> [Accessed 4 Jun 2020].

Sarkar, SK, Das, J., Ehsani, R. y Kumar, V. 2016. Towards autonomous phytopathology: Outcomes and challenges of citrus greening disease detection through close-range remote sensing. In 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) 2016. Pp. 5143-5148. DOI: [10.1109/ICRA.2016.7487719](https://doi.org/10.1109/ICRA.2016.7487719)

Savino, G.C.M.A., Zerda, H.R. y Diodato, L. 2015. Modelos de distribución de especies. In Día del SIG 2014, 1st ed. [online] Universidad Nacional de Santiago del

Estero.pp.30-36. Available at:
<https://www.researchgate.net/publication/286927344_Modelos_de_Distribucion_Potencial_de_Especies> [Accessed 11 December 2020].

SENASICA, 2018. Servicio Nacional de Sanidad Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria. [online] Available at: <http://sinavef.senasica.gob.mx/SIRVEF/HLB.aspx>.>[Accessed 18 November 2020].

SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera), 2017. Huanglongbing, análisis epidemiológico Tabasco. [online]. Available at:<https://nube.siap.gob.mx>[Accessed 11 Jun 2020].

SIAP, 2019. Anuario estadístico de la producción agrícola: Cierre de la producción agrícola por municipio. [online] Available at: <<https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>>[Accessed 18 November 2020].

SINAVEF (Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria), 2010. Reporte Epidemiológico Huanglongbing (HLB), San Luis Potosí. [online] Available at:<<http://langif.uaslp.mx/documentos/privada/BoletinesVarios/hlb/005.pdf>>[Accessed 18 November 2020].

Srivastava, V., Lafond, V. y Griess, V. 2019. Species distribution models (SDM): applications, benefits and challenges in invasive species management. *CAB Reviews Perspectives in Agriculture Veterinary science Nutrition and Natural Resources*, Núm. 14, Pp. 1-13. DOI <https://doi.org/10.1079/PAVSNNR201914020>.

Tatineni, S., Sagaram, U.S., Gowda, S., Robertson, C.J., Dawson, W.O., Iwanami, T. y Wang, N. 2008. In planta distribution of “*Candidatus Liberibacter asiaticus*” as revealed by polymerase chain reaction (PCR) and real-time PCR. *Phytopathology*. Vol. 98. Pp. 592-599.

Torres-Pacheco, I., López-Arroyo, J.I., Aguirre-Gómez, J.A., Guevara-González, R.G., Yáñez-López, R., Hernández-Zul, M.I. y Quijano-Carranza, J.A. 2013. Potential distribution in Mexico of *Diaphorina citri* (Hemiptera: Psyllidae) vector of Huanglongbing pathogen. *Florida Entomologist*, Vol. 96, Núm. 1, Pp. 36–47. Available at: <https://www.jstor.org/stable/23608870?seq=1>[Accessed 4 Jun 2020].

UJAT (Universidad Juárez Autónoma de Tabasco), 2019. Doctorado en ciencias en ecología y manejo de sistemas tropicales (PNPC). Posgrados. [online] <https://www.ujat.mx/dceymst/17620>

Vallejo, P.M.R., Galindo, M.M.G., Ramírez E.M.G., González, F.J., Navarro C.H.R. y Contreras S.C. 2016. Raman spectroscopy an option for the early detection of citrus Huanglongbing. *Applied spectroscopy*. Núm. 70, Pp. 829-839. <https://www.osapublishing.org/as/abstract.cfm?URI=as-70-5-829>

Vásquez, L.C. y Vásquez, P.C. 2014. Producción de limón tahití (*Citrus latifolia tanaka*) con aplicación de humus de lombriz, Casarabe, Beni, Bolivia. *Revista Agrociencias amazonia*, Núm. 3. Pp. 6.

Wang, R., Yang, H., Luo, W., Wang, M., Lu, X., Huang, T., Zhao, J. y Li, Q. 2019. Predicting the potential distribution of the Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri* (Kuwayama), in China using the MaxEnt model. *PeerJ*, Núm. 7, p.e7323. DOI <https://doi.org/10.7717/peerj.7323>.

Wetterich, C.B., Oliveira, R.F.N., Belasque, J. y Marcassa, L.G. 2016. Detection of citrus canker and Huanglongbing using fluorescence imaging spectroscopy and support vector machine technique. *Applied optics*, Núm. 55, Pp. 400-407. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.55.000400>

Yan, H., Feng, L., Zhao, Y., Feng, L., Zhu, C., Qu, Y. y Wang, H. 2020. Predicting the potential distribution of an invasive species, *Erigeron canadensis* L., in China with a maximum entropy model. *Global Ecology and Conservation*, Núm. 21, p.e00822. DOI <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00822>.

Yi, Y., Cheng, X., Yang, Z., Wieprecht, S., Zhang, S. y Wu, Y. 2017. Evaluating the ecological influence of hydraulic projects: A review of aquatic habitat suitability models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Núm. 68, Pp. 748-762. DOI <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.138>.

Yin, N., Liu, R., Zeng, B., Liu, N. 2019. A review: UAV-based Remote Sensing. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* Núm. 490, Pp. 1-6 doi:10.1088/1757-899X/490/6/062014

Zhang, H., Luo, D., Mu, X., Xu, M., Wei, H., Luo, J., Zhang, J. y Hu, Y.C. 2016. Predicting the potential suitable distribution area of the apple snail *Pomacea canaliculata* in China based on multiple ecological niche models. *Ying yong shen tai xue bao = The journal of applied ecology/Zhongguo sheng tai xue xue hui, Zhongguo ke xue yuan Shenyang ying yong sheng tai yan jiu suo zhu ban*, Núm. 27, Pp.1277-1284. DOI <https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.201604.027>.

Zhu, X., y Liu, D. 2014. Improving forest aboveground biomass estimation using seasonal Landsat NDVI time series. Journal of Photogrammetry and Remote sensing, Pp. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.08.014>

Zolkos, S.G., Goetz, S.J., Dubayah, R. 2013. A meta-analysis of terrestrial aboveground biomass estimation using lidar remote sensing. Remote Sensing of Environment, Núm. 128, Pp. 289-298. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.017>

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.