



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN GEOGRAFÍA

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

**Definición espacio temporal de unidades regionales de
producción citrícola para el manejo del Huanglongbing y
Diaphorina citri Kuwayama (Hemiptera: Liviidae) en Colima**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE

DOCTOR EN GEOGRAFÍA

P R E S E N T A

RACIEL HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ

DIRECTORA DE TESIS:

DRA. GUADALUPE REBECA GRANADOS RAMÍREZ

Instituto de Geografía

ASESORES

Dr. Gustavo Mora Aguilera

Colegio de Postgraduados

Dr. Raúl Aguirre Gómez

Instituto de Geografía

Dra. Imelda León García

Consejo Nacional Consultivo Fitosanitario

Ciudad Univeritaria, Cd de México, febrero de 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

CONTENIDO

I. Introducción	4
II. Objetivos	9
III. Patosistema limón mexicano (<i>Citrus aurantifolia</i>)- <i>Candidatus liberibacter</i> spp.....	10
3.1 origen y distribución del Huanglongbing y su vector (<i>diaphorina citri</i>) en México	10
3.2 descripción del patosistema limón mexicano- <i>Candidatus Liberibacter asiaticus</i>	12
IV. Reconversión de cultivos resultado de la presencia de CLas en Colima México..	31
4.1 introducción.....	31
4.2. Materiales y métodos	31
4.3 resultados y discusión.....	37
4.4 conclusiones	47
V. Evaluación del Huanglongbing en campo y creación de base de datos espacial para el analisis epidemiológico del sistema epidemiológico limón mexicano-CLas en Colima.	55
5.1 introducción.....	55
5.2 diseño conceptual de la base de datos	59
5.3 diseño físico la base de datos	63
5.4. Conclusiones	68
VI. Análisis de riesgo regional de dispersión del Huanglongbing a través del método de análisis jerárquico de procesos.....	74
6.1. Introducción	74
6.2. Materiales y métodos	76
6.3. Resultados y discusión	80
6.5. Conclusiones	104

Índice de Figuras

Figura 1. Distribución actual de Huanglongbing en el mundo.(SENASICA, 2018)	11
Figura 2. Distribución actual de Huanglongbing en México.(SENASICA, 2018)	12
Figura 3. Área de estudio, municipios de tecomán y Armería, estado de colima.	37
Figura 4. Superficie agrícola de los municipios de Tecomán y Armería, colima del año 2010-2014.	40
Figura 5. Disposición espacial de los cultivos de mayor importancia en la zona de estudio	41
Figura 6. Disposición espacial de huertas de las diferentes especies de limón en la zona de estudio	42
Figura 7. Delimitación de áreas de influencia de las huertas de limón en un radio de 500 m.	43
Figura 8. Superficie sembrada de los principales cultivos para la región de Tecomán y Armería, colima.	45
Figura 9. Índice de densidad cítrica relativa a la superficie sembrada para el área de estudio.	47
Figura 10. Modelo descriptivo simplificado del sistema epidemiológico limón mexicano-CLas	60
Figura 11. Modelo entidad-relación para el análisis del sistema epidemiológico limón mexicano-CLas	63
Figura 12. Interface para la toma de datos en campo para la base de datos espacial del sistema epidemiológico limón mexicano-CLas	65
Figura 13. Mapa de riesgo respecto a la incidencia del muestreo 1 en 2012	81
Figura 14. Mapa de riesgo respecto a la incidencia del muestreo 2 en 2012	82
Figura 15. Mapa de riesgo respecto a la incidencia del muestreo 3 en 2013	83
Figura 16. Mapa de riesgo respecto a la incidencia del muestreo 4 en 2014	84
Figura 17. Mapa de riesgo respecto a la severidad del muestreo 1 en 2012	85
Figura 18. Mapa de riesgo respecto a la severidad del muestreo 2, en 2012	86
Figura 19. Mapa de riesgo respecto a la severidad del muestreo 3, en 2013	87
Figura 20. Mapa de riesgo respecto a la severidad del muestreo 4, en 2014	88
Figura 21. Distribución de huertas de limón de acuerdo a su edad	89
Figura 22. Continuidad cítrica considerando un movimiento de 500 m del vector.	90
Figura 23. Índices de abundancia cítrica de acuerdo al radio de riesgo	91
Figura 24. Unidades climáticas de los municipios de Tecomán y Armería. (INEGI, 2017)	93
Figura 25. Comportamiento de la temperatura media en la zona de estudio	94
Figura 26. Comportamiento de la humedad relativa	95
Figura 27. Distribución de la humedad relativa en la zona de estudio	96
Figura 28. Distribución de las isoyetas para el área de estudio. (INEGI, 2017)	97
Figura 29. Comportamiento de la precipitación diaria en la zona de estudio	97
Figura 30. Jerarquías de criterios del sistema epidemiológico limón mexicano-CLas	101
Figura 31. Mapas de dispersión de riesgo para los muestreos 2012, 2013 y 2014	103

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Relación de especies en las que se ha encontrado Huanglongbing (Halbert y Manjunath, 2004) mencionado por (SENASICA, 2012).	13
Cuadro 1. Relación de tablas contenidas en la base de datos espacial para el análisis epidemiológico de HLB en Colima.	67
Cuadro 3. Categorías de riesgo establecidas para el sistema epidemiológico limón mexicano-CLas	99
Cuadro 4. Matriz de criterios normalizados para el análisis del sistema epidemiológico limón mexicano-CLas	101
Cuadro 5. Ponderaciones e índices de consistencia definidas para los criterios univariados	102
Cuadro 6. Matriz de priorización del riesgo para la dispersión de Huanglongbing	103

I. INTRODUCCIÓN

En México, la actividad citrícola comprende actividades del sector primario, la agroindustria y la generación de servicios entre los más importantes, se destaca como actividad económica debido a la superficie sembrada y al número de empleos directos e indirectos que genera (Flores-Virgen *et al.*, 2010). Existen 540,000 ha cultivadas de cítricos distribuidas en 23 estados de la república, de las que se estima una producción de siete millones de toneladas de fruta con un valor de 10,000 millones de pesos anuales; lo que ubica al país como el quinto productor mundial de cítricos (SENASICA, 2016; SIAP, 2016)

El cultivo de cítricos tiene en México condiciones físicas adecuadas para su establecimiento y desarrollo, el 70% de los estados que conforman el territorio nacional están relacionados con la actividad agrícola en forma comercial, sin embargo, existen también factores bióticos amenazan la producción citrícola (Robles-González *et al.*, 2011). En México se han reportado alrededor de 74 especies de insectos y ácaros como plagas de los cítricos, además de enfermedades causadas por otros agentes bióticos (López-Arroyo y Loera-Gallardo, 2004). La bacteria *Candidatus Liberibacter* spp. agente causal del huanglongbing (Huanglongbing), a partir de su aparición en diferentes zonas geográficas del mundo se ha convertido en la plaga de mayor importancia para la citricultura, debido por su carácter destructivo y la dificultad de un manejo rentable (Bové, 2006). A su llegada a la república mexicana en 2009 (Moreno-Enríquez *et al.*, 2010) originó por parte de las autoridades fitosanitarias el establecimiento de protocolos de emergencia ante su amenaza, a la fecha es una de las campañas operada por la Dirección de Sanidad Vegetal en México dependencia a cargo del Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA), logrando

mantener el estatus de plaga presente bajo control fitosanitario (SENASICA, 2016; SENASICA, 2018)

Experiencias en el manejo de la enfermedad del Huanglongbing en México y otras regiones del mundo como Asia, Brasil, Estados Unidos de América, indican que la principal estrategia para reducir la tasa de infección, consiste en prevenir la dispersión del vector, por lo que el esfuerzo se ha enfocado al establecimiento de grandes áreas de control regional del psilido asiático de los cítricos (PAC) nombre común que se le ha dado a *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera:liviidae), insecto que de manera natural actúa como vector de la bacteria que ocasiona el Huanglongbing; a estas áreas en México se les ha denominado “Áreas Regionales de Control (ARCOS)” del psilido asiático; los ARCOS se delimitaron y operan actualmente en las principales las regiones cítricas de México (SENASICA, 2018; Flores-Sánchez *et al*, 2017)

La situación actual del sistema epidemiológico asociado a Huanglongbing en el estado de Colima indica que el fenómeno de dispersión de la bacteria está influenciado por múltiples factores, que deben tomarse en cuenta con el fin de definir el riesgo de establecimiento a través de la dispersión de *D. citri*, y por tanto deben ser considerados en la definición de los ARCOS. Investigaciones en el mundo han establecido la influencia de los factores del clima para el desarrollo de *D. citri* (Aubert, 1987; Green y Catling, 1971); En México los expertos han delimitado los factores agronómicos de mayor importancia en el proceso de establecimiento de la bacteria y la importancia que tienen en el tiempo y espacio para establecer zonas de riesgo, se han desarrollado conocimientos de los aspectos biológicos del vector asociados a la fenología de los cítricos como su principal hospedante (Flores-Sánchez *et al*, 2017; Mora-Aguilera *et al.*, 2016; Esquivel-Chávez *et al*, 2012; Robles-González *et al.*,

2011; Hall, 2008; Halbert y Manjunath, 2004; Lopez-Arroyo y Loera-Gallardo, 2004); de ahí la justificación de su análisis espacio temporal, debido a que condicionan y desencadenan los factores para la dispersión de *Candidatus Liberibacter asiaticus* (CLAs) (Gottwald y Aubert, 1991; Luo *et al.*, 2012).

Análisis realizados con anticipación a los reportes de la presencia del Huanglongbing en México y en particular en el estado de Colima, ubicaban a la región citrícola de los municipios de Tecomán y Armería con un alto riesgo de baja productividad y por tanto de pérdidas económicas, estos análisis resultaron acertados en la estimación global de pérdidas en el 2010. Los escenarios epidemiológicos planteados, reconocieron a la variable superficie sembrada de cítricos integradas en índices de superficie y cítricos, como el principal factor para la estimación de pérdidas (Salcedo-Baca, *et al.*, 2010)

En México para el manejo del Huanglongbing se definieron áreas de control (ARCOS), con fundamento en variables epidemiológicas como el índice de susceptibilidad del cultivo, densidad de hospedante, abundancia relativa, efectos agroclimáticos en la densidad del vector, así como la cantidad y distribución de focos (Mora-Aguilera *et al.*, 2016; Flores-Sanchez *et al.*, 2017). El objetivo es retrasar la dispersión del CLAs para mitigar el impacto del Huanglongbing, situación que se ha logrado con éxito principalmente en las especies de cítricos dulces. (SENASICA, 2012, 2016, 2018)

Lo anterior implica gran relevancia en el escenario de la decisión del establecimiento de cultivos que deben adoptar los productores de Tecomán y Armería, ante la disyuntiva de sustituir huertas infectadas por CLAs; un importante porcentaje han optado por el cambio de cultivos como papaya, piña, plátano, caña de azúcar y recientemente frutillas (arandanos,

frambuesa y zarzamora) entre los más importantes, sin embargo, otro importante número han optado por mantener la superficie sembrada de cítricos, estableciendo nuevas plantaciones. Aunado a esto, el ritmo de sustitución de huertas afectadas por Huanglongbing se ha reducido ya que los productores han adoptado estrategias de integrar prácticas agronómicas de nutrición y manejo fitosanitario, que les permitan convivir con la enfermedad y alargar la vida productiva de los árboles (Manzanilla-Ramirez *et al.*, 2010).

El planteamiento de un modelo de análisis epidemiológico involucra factores múltiples que pueden ser agrupados en condicionantes y desencadenantes de los riesgos de dispersión del CLAs, lo que representa una complejidad importante si se considera que los escenarios experimentales para este tipo de amenazas fitosanitarias son limitados; en primer lugar por los riesgos que significa el mantener áreas experimentales en condiciones naturales, debido al carácter destructivo de la enfermedad; y por otro lado, a la falta de datos que permitan una modelación tradicional con datos estadísticos amplios debido a su reciente aparición y falta de experiencia en el manejo.

El presente trabajo plantea una metodología que integra las experiencias de éxito obtenidas en México, Brasil y EU entre otros, para el establecimiento de manejo regional del problema (Mora-Aguilera *et al.*, 2016; Flores-Sanchez *et al.*, 2017), para que a través de múltiples disciplinas se valore la variabilidad espacio-temporal de los factores que intervienen en la dispersión del CLAs y su vector, se pretende con ello definir escenarios factibles de análisis, fundamentados en métodos analíticos que integren los factores existentes en las regiones citrícolas de México. El objetivo es lograr el desarrollo de una metodología de estimación de áreas de riesgo que pueda replicarse en las diferentes zonas citrícolas y que apoye la decisión del gobierno federal, los técnicos de campo y a los productores agrícolas, con base en las

condiciones espaciales y temporales del entorno de las unidades de producción, así como de su práctica agronómica.

Para lograr este objetivo se plantea el análisis del sistema epidemiológico asociado a Huanglongbing mediante la metodología analítica del análisis jerárquico de procesos (AJP), que consiste en la consideración interrelacionada de los factores de mayor relevancia que desencadenan la ocurrencia y prevalencia del CLAs. El análisis multifactorial AJP se ha utilizado con éxito en diversas áreas para la prevención de ocurrencia de eventos que implican riesgos de desastres o fenómenos de ocurrencia extrema (Saaty, 1990). La metodología por tanto se hace factible ante el escenario de alta intensidad del Huanglongbing en el estado de Colima.

Para el análisis regional de la epidemiología del Huanglongbing con enfoque en el principio de prevención debe considerarse a la planta como el centro del sistema epidemiológico (Mora-Aguilera *et al.*, 2013), por ello, se utilizan técnicas de percepción remota para la determinar la superficie sembrada y la disposición espacial de los cultivos en la región de interés. Los factores referentes al clima son analizados a través de la red de estaciones establecida por el INIFAP en las regiones agrícolas del estado de Colima y las variables de manejo a través del muestreo en campo de huertas centinelas donde se midieron variables de brotación vegetativa, la incidencia de la enfermedad, severidad, producción, vigor, edad y manejo agronómico a lo largo de los años 2011 a 2014.

El análisis integrado de estos factores y el establecimiento de sus relaciones en el sistema epidemiológico asociado a Huanglongbing permitió plantear los siguientes objetivos

II. OBJETIVOS

Objetivo General: Definir a través del AJP áreas regionales de manejo de *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Liviidae) y establecer su impacto en el riesgo de dispersión del CLAs bajo un escenario pre endemico

Objetivos Particulares

1. Delimitar las áreas agrícolas productivas regionales a través de técnicas de percepción remota para definir el riesgo potencial de dispersión del CLAs y *D. citri*.
2. Conocer el impacto de la presencia y prevalencia del CLAs en la dinámica de cultivos en la región citrícola de Colima.
3. Desarrollar el análisis espacio-temporal de los riesgos de dispersión del CLAs a través del análisis jerárquico de procesos con el apoyo de un sistema de información geográfico (SIG).

III. PATOSISTEMA LIMÓN MEXICANO [*Citrus aurantifolia* (Christm) Swingle]- *Candidatus Liberibacter asiaticus*

3.1 Origen y distribución del Huanglongbing y su vector (*Diaphorina citri* Kuwayama) en México

El “Huanglongbing” (Huanglongbing), es una enfermedad destructiva de los cítricos a la que son sensibles prácticamente todas las especies comerciales cultivadas, independientemente del patrón que se utilice. El Huanglongbing tiene origen en el sur de China, donde ha existido desde 1870 en la provincia de Guangdong, lugar de donde también toma su nombre. Es causada por una bacteria endógena, restringida a los tubos del floema denominada tentativamente *Candidatus Liberibacter asiaticus* (CLas), es transmitida, por los insectos Liviidos *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Liviidae) en Asia y América, y *Trioza erytrae* Del Guercio en África; para el Huanglongbing no se conoce control sustentable y efectivo, con excepción de la prevención de la infección de los árboles (Bové, 2006) y el manejo integrado en ARCOS (Mora-Aguilera *et al.*, 2014).

Hasta 2003, el Huanglongbing estuvo restringido a tres grandes regiones geográficas: África, Península de Arabia y Asia. En 2004 se da el primer reporte en América en el estado de Sao Paulo Brasil (Texeira *et al.*, 2005); posteriormente en 2005 se confirma su detección en Florida, E.U.A, dos de las más grandes regiones cítricas del mundo (Bové, 2006). En 2005 se da el primer reporte de una nueva especie llamada *Candidatus Liberibacter americanus* que afecta al 92% de las plantas muestreadas en el estado de Sao Paulo en Brasil (Texeira *et al.*, 2005). Esta especie ha sido gradualmente desplazada por CLas que es la especie prevalenciente en América.

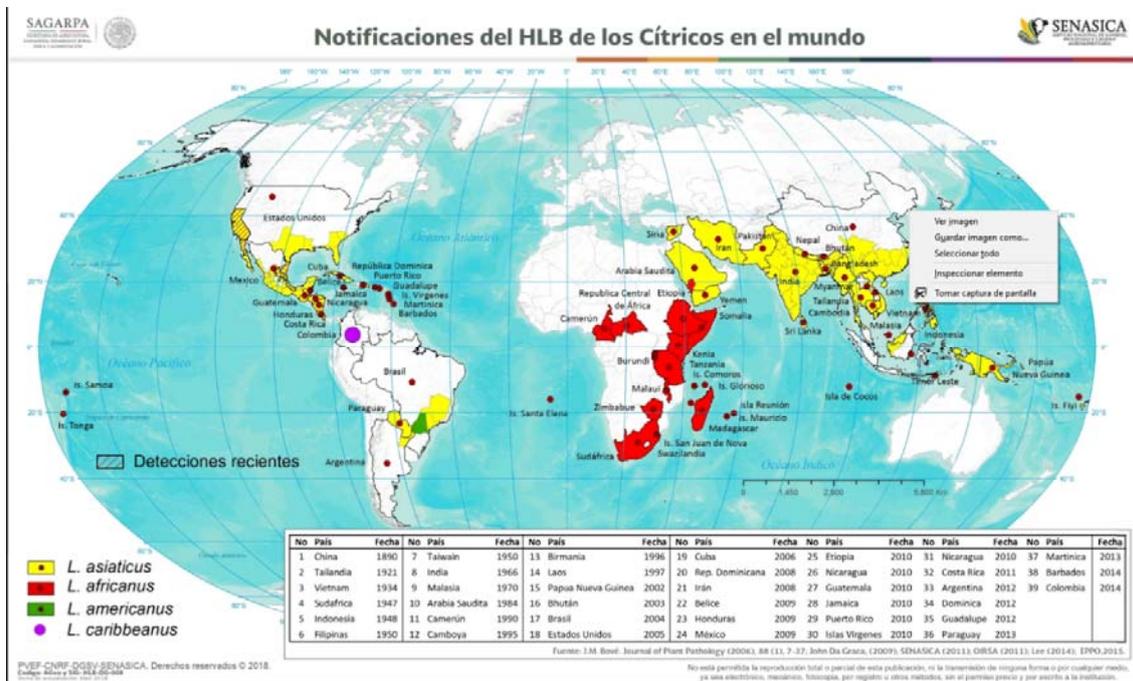


Figura 1. Distribución actual de Huanglongbing en el mundo (SENASICA, 2018).

En México, el primer reporte fue en julio de 2009, en Tizimin Yucatán, aunque por la severidad de los síntomas se presume que la enfermedad tenía tiempo en el área. En ese mismo año se da la detección en Jalisco y Nayarit. En el municipio de Ahuacatlán ocurrió el primer reporte en un huerto comercial (Moreno-Enríquez *et al.*, 2010). Actualmente, el Huanglongbing se encuentra presente en 496 municipios de 24 entidades de México, 401 son considerados cítricos (Figura 1). Ante la situación de riesgo que representaría la enfermedad para la citricultura mexicana y la presencia del PAC en el país desde el año 2002, el Gobierno Federal, a través del Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA), inició en el 2008 la campaña fitosanitaria de prioridad nacional en los 24 estados, que incluye el Manejo Integrado de Plagas (MIP)(SENASICA, 2018).



Figura 2 Distribución actual de Huanglongbing en México.(SENASICA, 2018)

En abril de 2010, se detectó la enfermedad en árboles de limón mexicano en un huerto comercial en la localidad de “El Ahijadero” en el municipio de Tecomán Colima. Posteriormente se detectaron árboles positivos en los municipios de Tecomán, Armería, Manzanillo y Coquimatlán, desde los límites con Michoacán hasta los límites con Jalisco (Flores-Virgen *et al.*, 2010). La tendencia creciente de huertas sintomáticas alcanzó una proporción del 34.3% en 2011. Actualmente el Huanglongbing es endémico en el estado de Colima, localizándose árboles sintomáticos en todas las zonas productoras de limón mexicano desde las plantaciones ubicadas en la franja costera hasta plantaciones situadas cerca de los 400 msnm (Robles-González *et al.*, 2011). La erradicación de plantas no fue posible debido a que el umbral económico se superó rápidamente (Robles-González *et al.*, 2013), originando que el avance de la enfermedad se diera con mayor velocidad e intensidad en esta región donde la incidencia promedio es del 100% (Flores Sánchez, 2016).

3.2 Descripción del patosistema limón mexicano-CLas

3.2.1 Hospedantes

El Huanglongbing es una enfermedad que afecta plantas de la familia Rutaceae (cuadro 1). Afecta severamente a la naranja (*Citrus sinensis*), mandarina (*Citrus reticulata*) y tangerina (*Citrus deliciosa*) (SENASICA, 2012), aunque prácticamente CLas ataca a todas las especies comerciales de cítricos cultivadas (Bové, 2006).

Cuadro 1. Relación de especies en las que se ha encontrado Huanglongbing (Halbert y Manjunath, 2004) mencionado por (SENASICA, 2012).

Familia	Nombre Científico	Nombre Común en inglés	Nombre Común en español
Apocynaceae	<i>Catharantus roseus</i>	Periwinkle	Vinca
Convolvulaceae	<i>Cuscuta australis</i>		Cúscuta
Rutaceae	<i>Citrus aurantifolia</i>	Key lime	Lima Mexicana
	<i>Citrus aurantium</i>	Sour orange	Naranja Agría
	<i>Citrus grandis</i>	Grapefruit	Pomelo
	<i>Citrus limon</i>	Lemon	Limon
	<i>Citrus paradisi</i>	Grapefruit	Toronja
	<i>Citrus sinensis</i>	Sweet Orange	Naranja Dulce
	<i>Citrus</i> sp		Cítricos
	<i>Murraya panicilata</i>	Orange jazmine	Limonaria

El CLas afecta los tejidos del floema, en estudios en naranja dulce se localizaron paquetes de floema necrosado distribuido a través del sistema vascular de hojas maduras, que bloqueaban el flujo de translocación (Bové, 2006; Halbert y Manjunath, 2004).

Análisis histológicos en México mostraron que CLas afecta a cítricos agrios y que su efecto se modifica por factores del ambiente y manejo, se presenta acumulación de almidones superiores a naranja dulce, observándose severidad mayor para limon mexicano que origina clorosis generalizada y absción foliar (Esquivel Chávez, 2016; Esquivel-Chávez *et al.*, 2012)

3.2.2 Agente causal del Huanglongbing

El patógeno causante del Huanglongbing es una bacteria Gram negativa *Candidatus Liberibacter* (*Ca L*) de la cual se conocen hasta ahora tres especies *Candidatus Liberibacter africanus* (CLaf), *Candidatus Liberibacter asiaticus* (CLas) y *Candidatus Liberibacter americanus* (CLam). El *Candidatus Liberibacter africanus* es sensible al calor y se presenta sólo en áreas frías, con temperaturas debajo de 30°C a 32°C, por su parte el Huanglongbing en Asia es tolerante al calor, y los síntomas siempre ocurren cuando las temperaturas están por arriba de los 30°C. Estas diferencias biológicas fueron la base para establecer que la bacteria del Huanglongbing en África y Asia no son idénticas (Garnier *et al.*, 2000; Bové 2006).

En 2004, en el estado de Sao Paulo, Brasil, se encontraron plantas con síntomas de Huanglongbing en naranja dulce, las pruebas de Reacción en Cadena de la Polimerasa (PCR en ingles) mostraron suficientes diferencias filogenéticas en relación de los *Liberibacter* conocidos, por lo que se declaró la existencia de *Candidatus Liberibacter americanus*, que se encuentra sólo restringido a Brasil (Texeira *et al.*, 2005). En 2005 se detectaron plantas sintomáticas en el estado de Florida, detectándose mediante pruebas de PCR que el agente causal era CLas (Sutton *et al.*, 2005), en México los aplotipos presentes en la Península de

Yucatán al ser diagnosticados con pruebas de PCR, también mostraron una correspondencia filogenética del 99% con CLas (Moreno-Enríquez *et al.*, 2010).

3.2.3 Mecanismos Dispersión

Una forma de diseminación del agente causal del Huanglongbing a través de grandes distancias es el traslado de material propagativo contaminado, debido a que el Huanglongbing es una enfermedad transmisible por injerto (Bové, 2006; Halbert y Manjunath, 2004), sin embargo, el mecanismo natural primario de diseminación es a través de los insectos psílicos *Trioza erytreae* y *Diaphorina citri*. Experimentos y observaciones de campo mostraron que existe una adaptación entre el vector y el patógeno debido a que el Huanglongbing en África ocurre sólo en áreas frías coincidiendo con el psílido vector *T. erytreae* que es sensible a altas temperaturas combinadas con bajas humedades relativas (Green y Catling, 1971). Por el contrario, el Huanglongbing en Asia es tolerante al calor y sus síntomas se presentan cuando ocurren temperaturas constantes por encima de los 30°C, lo que es también coincidente con las condiciones de desarrollo del vector *D. citri* (Bové, 2014).

Las epidemias en Brasil y en Florida muestra que el vector comúnmente se establece con anticipación al Huanglongbing, no contar con mecanismos oportunos de detección hacen imposible estrategias de erradicación o contención. La detección de *D. citri* anticipa la ocurrencia del patógeno (Halbert y Manjunath, 2004; Bové, 2006).

En México se reporta la presencia de *D. Citri* en Cancún en 2003 (Halbert y Nuñez, 2004), a partir de ese momento se ha distribuido en todas las zonas cítricas de México (SENASICA,

2016). En abril de 2010 se da el primer reporte de Huanglongbing en Colima, en un huerto comercial en el municipio de Tecomán, que presenta clima cálido semiseco a cálido subhúmedo (Flores-Virgen *et al.*, 2010) .

3.2.4 Mecanismos de detección de Huanglongbing

Para la detección de *Candidatus Liberibacter* spp se utilizan pruebas de PCR con ADN de plantas infectadas o de insectos (De la Rosa Anaya, 2016; Flores-Sanchez *et al.*, 2015; Esquivel-Chávez *et al.* 2012; Bové, 2006). CLas también puede ser detectada con microscopio electrónico, o mediante pruebas de ELISA (Garnier *et al.*, 2000).

El diagnóstico con base exclusivamente en síntomas puede omitir árboles infectados, se estima que entre el 15% al 20% de las plantas infectadas no son diagnosticadas adecuadamente en revisiones visuales (Halbert y Manjunath, 2004).

3.2.5 Síntomas

Existen síntomas que son característicos para las plantas infectadas con Huanglongbing y que se presentan en la mayoría de las especies de cítricos, sin embargo, puede resultar difícil su diagnóstico porque puede confundirse con otras clorosis, que regularmente las plantas presentan asociadas a otro tipo de enfermedades o deficiencias nutrimentales.

En México los síntomas inducidos por el CLas fueron la presencia de punteados cloróticos progresivos, moteado difuso hasta presentar manchas angulares asimétricas; una característica exclusiva de limón mexicano fue la defoliación generalizada de los árboles. La nervadura central mostró aclaramiento, engrosamiento y acorchamiento (Esquivel-Chávez *et*

al., 2012), con el tiempo los síntomas se extienden a todo el dosel del árbol (Esquivel-Chávez *et al.*, 2012; Gómez, 2010; Gottwald *et al.*, 2007; Bové, 2006).

El Huanglongbing induce síntomas en frutos, observándose principalmente en naranja dulce, mandarinas y algunos pomelos. Los frutos dañados son pequeños, asimétricos al presentarse la madurez se observa una inversión de color. Para observar los síntomas en el fruto este debe ser partido a la mitad en forma perpendicular a su eje, observándose semillas abortadas de color café o negras. Los síntomas en limón mexicano muestran una reducción importante en el tamaño del fruto en árboles con al menos el 50% de la copa dañada (Robles-González *et al.*, 2011).

3.2.6 Biología de *Diaphorina citri* Kuwayama

El ciclo de vida de *D. citri* está dividida en 3 etapas, huevo, ninfa y adulto; tarda en completarse de 15 a 47 días, dependiendo de la temperatura, siendo el rango entre 25-28°C el óptimo para su desarrollo, los nuevos adultos alcanzan la madurez reproductiva entre los 2 y 3 días (Hall, 2008). Los adultos pueden vivir por varios meses de 21 a 32 días si la temperatura es de 24°C lo que hace posible tener de 9 a 10 generaciones por año. Estudios de generaciones potenciales en México indican la posibilidad de tener hasta 34 generaciones con temperaturas medias anuales de entre 23.2 a 29.7 °C a una altitud de 50 a 420 msnm, siendo los estados de Colima, Jalisco, Michoacán, Nayarit, Sinaloa, Tabasco, Veracruz y Yucatán (Díaz-Padilla *et al.*, 2014; Torres-Pacheco *et al.*, 2013). En huertos de limón mexicano se encontraron que los rangos de vida para *D. citri* abarcan entre 22 y 28 días con temperaturas que oscilaron entre los 15°C a 32.5°C (Robles-González *et al.*, 2011).

Los huevos y ninfas se encuentran siguiendo una disposición de agregados, mientras que los adultos comúnmente se encuentran de manera aleatoria (Halbert y Manjunath, 2004; Hall, 2008; Mead y Fasulo, 2014).

D. citri no se encuentra en elevaciones superiores a los 1300-1500 msnm probablemente por las temperaturas frías que ocurren, en Japón Ashihara citado por Hall (2008) reporta que a -3.3°C se tiene una mortalidad del 94 al 96% de adultos, en México se detectó también una cota altitudinal donde el desarrollo del insecto es limitado por el descenso de la temperatura asociado a la altitud (Díaz-Padilla *et al.*, 2014).

Humedades relativas altas que exceden el 87% pueden inducir mortalidades de ninfas del 60% al 70%, además cuando las lluvias exceden los 150 mm las poblaciones de *D. citri* se reducen debido a que las ninfas jóvenes y huevos caen de las hojas (Aubert, 1987; Halbert y Manjunath, 2004).

Robles *et al.* (2011), reporta una disminución de las poblaciones de la *D. citri* en por la muerte de brotes vegetativos causados por la antracnosis (*Colletotrichum acutatum*) la cual se presente en todos los años en Colima durante el periodo de lluvias. Huertos de limón persa en Nayarit mostraron que la densidad poblacional de *D. Citri* esta asociada a presencia de brotes, altas temperaturas y períodos sin lluvias (Fuentes *et al.*, 2014).

La actividad de los psilidos adultos puede darse a lo largo del día, siendo más activa cuando las temperaturas son cálidas y no existe viento, los psilidos pueden ser transportados de 0.5 a 1 km de distancia dependiendo de la velocidad sostenida del viento (Hall, 2008). Un estudio de gradientes de dispersión a partir de focos iniciales en Yucatán, mostro desplazamientos

entre 29 y 80 km con direccionalidad asociada a los vientos dominantes (Flores-Sanchez *et al.*, 2011b; Flores Sánchez, 2011a).

Interacción vector-hospedante-patógeno

D. citri tiene un aparato bucal adaptado para succionar savia de las plantas donde se alimenta (Hall, 2008), es considerado plaga en su fase de ninfa y adulto (Roistacher, 1996), porque se alimenta en brotes nuevos de follaje, lo que produce lesiones que causan que la hoja se enrolle, las secreciones de las ninfas son medio idóneo para el desarrollo de fumaginas (Michaud, 2004).

El daño más importante para la agricultura es por ser vector transmisor de la bacteria CLas. El adulto adquiere la bacteria al alimentarse de plantas infectadas y tiene la capacidad mantenerse latente hasta por 25 días dentro del cuerpo del insecto (Roistacher, 1996). CLas se transmite de planta en planta a través de la secreción de los ductos salivares de *D. citri* durante la alimentación (Aubert, 1987).

Bajo condiciones naturales, la dispersión del patógeno depende de la cantidad de inóculo disponible en el ambiente y la densidad de población del PAC que está estrechamente relacionada con la ocurrencia de nuevos brotes en el árbol, en las etapas de ninfas *D. citri* depende exclusivamente de los brotes jóvenes (Torres-Pacheco *et al.*, 2013; Hall, 2008), en Colima y Michoacán se encontraron cargas de inóculo mayores a otras regiones de México debido a la condición de endemidad del Huaglongbing en la zona (De la Rosa-Anaya, 2016). En Colima se reporta la presencia *D. citri*, coincidente con las etapas de emergencia de nuevos brotes (Robles-González *et al.*, 2011), esta característica propicia el aumento

explosivo de la población en períodos cortos dependiendo de la fecundidad de las hembras (Halbert y Manjunath, 2004).

Se han reportado 56 especies de rutáceas y vegetales emparentados como hospedantes de *D. citri*, determinándose que *Murraya paniculata* planta ornamental es el hospedante preferido (Halbert y Manjunath, 2004). Su y Huang citado por Halbert (2004), mencionan que el patógeno puede ser detectado entre 2.5 a 3.5 meses posterior a que emerjan las hojas de los brotes en un árbol enfermo, los síntomas se expresan también en un periodo similar. Esquivel (2014) encontro que en un período de 6 meses era posible visualizar los síntomas típicos de la presencia de CLas en limón mexicano y limon persa. El intervalo de tiempo entre la infección y la subsecuente posibilidad de adquisición del patógeno por nuevos vectores es desconocido (Halbert y Manjunath, 2004).

La eficiencia de transmisión por parte del PAC es variable entre el 1% al 80% por un solo insecto (Halbert y Manjunath, 2004; Xu *et al.*, 1988)

Las plantas infectadas se presenta en conglomerados, indicando que *D. citri* normalmente no vuela lejos y se desplaza a distancias cortas cuando es perturbada (Aubert *et al.*, 1996; Gottwald y Aubert, 1991; Hall, 2008), aunque las distancias a las que puede volar *D. citri* no has sido estudiadas lo suficiente, en experimentos las máximas capturas han ocurrido a 1.5 m de altura respecto al suelo (Halbert y Manjunath, 2004). Estudios de gradientes de focos desarrollados en la Península de Yucatán indican gradientes espaciales de 29 a 80 km posiblemente influenciado por la dirección de los vientos predominantes (Flores-Sanchez *et al.*, 2011b; Flores Sánchez, 2011a)

En Colima México el protocolo de detección establecido por el SENASICA en limón mexicano fue establecido para huertas de 4 a 10 años de edad, cercanas al mar o a cuerpos de agua, ríos, drenes; observándose una rápida dispersión de la enfermedad lo que coincide con lo ocurrido en Brasil (Flores-Virgen *et al.*, 2010).

En la región productora de limón mexicano de Tecomán Colima, la brotación vegetativa natural se da en dos períodos, el primero de noviembre a marzo al concluir la estación de lluvias y el segundo de marzo a abril por el incremento de las temperaturas. Está influenciada por la edad de la plantación, en plantas en desarrollo, la brotación vegetativa es constante a lo largo del año. En las huertas productivas se induce la brotación vegetativa a través de las practicas agronómicas como la poda, por lo que se puede tener brotes en cualquier época del año, asociado a la presencia de *D. citri* y con ello, riesgo latente de dispersión del CLas (Robles-González *et al.*, 2011)

Bibliografía Consultada

- Aubert, B. (1987). *Trioza erythrae* Del Guercio and *Diaphorina citri* Kuwayama (Homoptera:psylloidea), the two vectors of Citrus Greening Disease:Biological aspects and possible control strategies, *vol. 42*, 149-162.
- Aubert, B., Grisoni, M., Villemin, M., y Rossolin, G. (1996). A case study of Huanglongbing (greening) control in Reunion (pp. 276-278). Presentado en In Proc. 13th Conference of the International Organization of Citrus Virologists (IOCV), Riverside, California. Recuperado a partir de <http://swfrec.ifas.ufl.edu/Huanglongbing/database/pdf/00000675.pdf>
- Bové. (2006). Huanglongbing: a destructive, newly-emerging, century-old disease of citrus. *Journal of Plant Pathology*, 88(1), 7-37. <http://doi.org/10.4454/jpp.v88i1.828>
- Bové, J. (2014). Heat-tolerant Asian Huanglongbing meets heat-sensitive African Huanglongbing in the Arabian Peninsula! Why? *Journal of Citrus Pathology*, 1(1). Recuperado a partir de <http://escholarship.org/uc/item/1665n4x9>
- Da Graça, J. V. (2010). Etiology, history and world situation of citrus Huanglongbing. Presentado en 2o. Taller Internacional sobre el Huanglongbing y el Psílido Asiático de los Cítricos. Recuperado a partir de <https://sites.google.com/site/diaphorina/tallerHuanglongbing>
- De la Rosa Anaya, A. (2016). Distribución de la carga de inóculo regional de *Candidatus Liberibacter asiaticus* en *Diaphorina citri* en tres escenarios cítricos de México. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillos. Estado de México. 101 p.

Díaz-Padilla, G., López-Arroyo, J. I., Sánchez Cohen, I., Alberto Guajardo-Panes, R., Mora-Aguilera, G., & Quijano-Carranza, J. (2014). Áreas de abundancia potencial en México del vector del Huanglongbing, *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2007-0934, 5, 1137–1153.

<https://doi.org/10.29312/remexca.v5i7.836>

Esquivel Chávez, F. (2016). Dinámica de la concentración bacteriana de *Candidatus Liberibacter asiaticus* y su efecto en la expresión sintomática e histológica en cítricos agrios y dulces e implicaciones en el potencial de inóculo. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados, Montecillos. Estado de México. 165 p.

Esquivel-Chávez, F., Valdovinos-Ponce, G., Mora-Aguilera, G., Gómez-Jaimes, R., Velázquez-Monreal, J. J., Manzanilla-Ramírez, M. Á., ... López-Arroyo, J. I. (2012). Análisis histológico foliar de cítricos agrios y naranja dulce con síntomas ocasionados por *Candidatus Liberibacter asiaticus*. *Agrociencia*, 46(8), 769–782.

Etxeberria, E., Gonzalez, P., Achor, D., y Albrigo, G. (2009). Anatomical distribution of abnormally high levels of starch in Huanglongbing-affected Valencia orange trees. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 74(1), 76-83.
<http://doi.org/10.1016/j.pmpp.2009.09.004>

Flores Sánchez, J. L. (2011a). Análisis estructural de focos y gradientes de dispersión del Huanglongbing de los cítricos (Huanglongbing), en la Península de Yucatán. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillos. Estado de México. 75 p.

- Flores Sánchez, J. L. (2016). Epidemiología del Huanglongbing bajo tres escenarios regionales en México. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados, Montecillos. Estado de México. 289 p.
- Flores-Sanchez, J., Mora-Aguilera, G., Loeza-Kuk, E., Dominguez-Monge, S., Acevedo-Sánchez, G., Rivas Valencia, P., ... Sánchez-Rebolledo, F. (2011b). Gradientes de dispersión del Huanglongbing a partir de focos iniciales de infección en la Península de Yucatán.
- Flores-Sanchez, J., Mora-Aguilera, G., Loeza-Kuk, E., López-Arroyo, J. I., Dominguez-Monge, S., Acevedo-Sánchez, G., y Robles-García, P. (2015). Yield loss caused by *Candidatus Liberibacter asiaticus* in Persian lime, in Yucatan Mexico. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 33, 195–210.
- Flores-Sanchez, J., Mora-Aguilera, G., Loeza-Kuk, E., López-Arroyo, J. I., Gutierrez Espinosa, M. A., Dominguez-Monge, S., ... Robles-García, P. (2017). Diffusion model for describing the regional spread of Huanglongbing from first-reported outbreaks and basing an area wide disease management strategy. *Plant Disease*, 101. <https://doi.org/10.1094/PDIS-04-16-0418-RE>
- Flores-Virgen, R., Robles-González, M., Velázquez-Monreal, M., y Manzanilla-Ramirez, M. (2010). Situación Actual del Huanglongbing (Huanglongbing) en Limón Mexicano Bajo las Condiciones Agroecológicas de Colima. Presentado en Primer Simposio Internacional sobre el Mejoramiento Genético de Cítricos. Recuperado a partir de <http://colimaproduce.net/SIMPOSIO/archivos/DIPOSITIVA1.pdf>
- Fuentes, L. M. H., López, M. A. U., Jaimes, R. G., Arroyo, J. I. L., Monreal, J. J. V., y Santos, M. O. (2014). *El Huanglongbing y su vector Diaphorina citri en Limón*

Persa en Nayarit: Recomendaciones para su Manejo. (Primera Edición).

Guadalajara, Jalisco: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.

Garnier, M., Jagoueix-Eveillard, S., Cronje, P. R., Le Roux, H. F., y Bové, J. M. (2000).

Genomic characterization of a liberibacter present in an ornamental rutaceous tree, *Calodendrum capense*, in the Western Cape Province of South Africa. Proposal of «*Candidatus Liberibacter africanus subsp. capensis*». *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 50 Pt 6, 2119-2125.
<http://doi.org/10.1099/00207713-50-6-2119>

Gómez, H. D. (2010). Síntomas de Huanglongbing (Huanglongbing) y deficiencias nutricionales. Presentado en 2o. Taller Internacional sobre el Huanglongbing y el Psílido Asiático de los Cítricos. Recuperado a partir de <https://sites.google.com/site/diaphorina/tallerHuanglongbing>

Gottwald, T., da Graça, J., y Bassanezi, R. (2007). Citrus Huanglongbing: The Pathogen and Its Impact. *Plant Health Progress*. <http://doi.org/10.1094/PHP-2007-0906-01-RV>

Gottwald, T. R., y Aubert, B. (1991). Spatial pattern analysis of citrus greening in Shantou, China (pp. 421-427). Presentado en In Proc. 11th Conference of the International Organization of Citrus Virologists, Riverside, California. Recuperado a partir de http://afsrweb.usda.gov/SP2UserFiles/Place/66180000/gottwald_etal_1991_SpatialPattern.pdf

Green, G. C., y Catling, H. D. (1971). Weather-induced mortality of the citrus psylla, *trioza erytrae* (del guercio) (homoptera: psyllidae), a vector of greening virus, in some citrus producing areas of Southern Africa. *Agricultural Meteorology*, 8, 305-317.
[http://doi.org/10.1016/0002-1571\(71\)90118-X](http://doi.org/10.1016/0002-1571(71)90118-X)

- Halbert, S. E., y Manjunath, K. L. (2004). Asian citrus psyllids (sternorrhyncha: psyllidae) and greening disease of citrus: a literature review and assessment of risk in florida. *Florida Entomologist*, 87(3), 330-353. [http://doi.org/10.1653/0015-4040\(2004\)087\[0330:ACPSPA\]2.0.CO;2](http://doi.org/10.1653/0015-4040(2004)087[0330:ACPSPA]2.0.CO;2)
- Halbert, S. E., y Nuñez, C. A. (2004). Distribution of the Asian Citrus Psyllid, *Diaphorina citri* Kuwayama (Rhynchota: Psyllidae) in the Caribbean Basin. *Florida Entomologist*, 87(3), 401-402.
- Hall, D. G. (2008). Biology, history and world status of *Diaphorina citri*. *1er Taller Internacional sobre Huanglongbing de los cítricos (Candidatus Liberibacter spp.) y el psílido asiático de los cítricos (Diaphorina citri)*. Recuperado a partir de <https://afrsweb.usda.gov/SP2UserFiles/Place/66180000/HallDiaphorinabiologyhistoryworldstatus2008.pdf>
- López-Arroyo, J. I., y Loera-Gallardo, J. (2004). Situación actual de los vectores y otras plagas de importancia para la citricultura de las américas, 21. Recuperado a partir de <http://www.concitver.com/manualdesaneamientoydiagnostico/SITUACION%20ACTUAL%20DE%20LOS%20VECTORES%20Y%20OTRAS%20PLAGAS%20DE%20IMPORTANCIA%20PARA%20LA.pdf>
- Luo, W., Pietravalle, S., Parnell, S., van den Bosch, F., Gottwald, T. R., Ireya, M. S., y Parker, S. R. (2012). An improved regulatory sampling method for mapping and representing plant disease from a limited number of samples. *Epidemics*, 4(2), 68-77. <http://doi.org/10.1016/j.epidem.2012.02.001>
- Manzanilla-Ramírez, M., Flores-Virgen, R., Robles-González, M., y Velázquez-Monreal, M. (2010). Programa de manejo del Huanglongbing en el limón mexicano para el estado de Colima. Presentado en Primer Simposio Internacional sobre el Mejoramiento

- Genético de Cítricos. Recuperado a partir de <http://colimaproduce.net/SIMPOSIO/archivos/DIAPOSITIVA1.pdf>
- Mead, F. W., y Fasulo, T. R. (2014, diciembre 22). Asian Citrus Psyllid, *Diaphorina citri* Kuwayama (Insecta: Hemiptera: Psyllidae). Recuperado 6 de noviembre de 2015, a partir de <https://edis.ifas.ufl.edu/in160>
- Michaud, J. P. (2004). Natural mortality of Asian citrus psyllid (Homoptera: Psyllidae) in central Florida. *Biological Control*, 29(2), 260-269. [http://doi.org/10.1016/S1049-9644\(03\)00161-0](http://doi.org/10.1016/S1049-9644(03)00161-0)
- Mora-Aguilera, G., Acevedo-Sánchez, G., Flores-Sanchez, J., González-Gómez, R., y Robles-García, P. (2013). Applied Epidemiology to Plant Disease Risk Analyses.
- Mora-Aguilera, G., Flores-Sánchez, J., Acevedo-Sánchez, G., Domínguez-Monge, S., Oropeza-Salin, C., Flores-Olivas, A., ... Robles-García, P. (2014). Vigilancia Epidemiológica y Estatus Actual del Amarillamiento Letal del Cocotero, Punta Morada de la Papa y Huanglongbing de los Cítricos (Huanglongbing) en México. *Revista mexicana de fitopatología*, 32(2), 120–131.
- Mora-Aguilera, G., Robles-García, G., López-Arroyo, J. I., Flores-Sánchez, J., Acevedo-Sánchez, G., & E González-Gómez, L.-K. (2016). Situación Actual y Perspectivas del Manejo del Huanglongbing de los Cítricos Current situation and Perspectives for Management of Citrus Huanglongbing. *Revista mexicana de fitopatología*, 32, 108–119.
- Moreno-Enríquez, A., Minero-García, Y., Loeza-Kuk, E., Uc-Varguez, A., y Moreno-Valenzuela, O. (2010). Diversidad Molecular Del Gen 16s Rdna En *Candidatus Liberibacter Asiaticus* Aislados En La Peninsula De Yucatán. Presentado en 2o.

- Taller Internacional sobre el Huanglongbing y el Psílido Asiático de los Cítricos.
Recuperado a partir de <https://sites.google.com/site/diaphorina/tallerHuanglongbing>
- Robles-González, M., Velázquez-Monreal, J., Manzanilla-Ramirez, M., Flores-Virgen, R., Arredondo-Bernal, H., y Archila-Marroquin, A. B. (2011). Bioecología del Psílido Asiático de los Cítricos *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Psyllidae) en Limón Mexicano en Colima (pp. 46-53). Presentado en 2do. Simposio Nacional sobre Huanglongbing 2011 - Diaphorina. Recuperado a partir de <https://sites.google.com/site/diaphorina/Huanglongbing2simpnal>
- Robles-González, M., Velázquez-Monreal, J., Manzanilla-Ramirez, M., Orozco-Santos, M., Flores-Virgen, R., y Medina-Urrutia, V. (2011). El Huanglongbing En Árboles De Limón Mexicano [*Citrus Aurantifolia* (Christm) Swingle] Su Dispersión Y Síntomas En Colima, México (pp. 46-53). Presentado en 2do. Simposio Nacional sobre Huanglongbing 2011 - Diaphorina. Recuperado a partir de <https://sites.google.com/site/diaphorina/Huanglongbing2simpnal>
- Roistacher, C. N. (1996). The Economics of Living with Citrus Diseases: Huanglongbing (Greening) in Thailand (pp. 279-285). Presentado en In Proc. 13th Conference of the International Organization of Citrus Virologists (IOCV), University of California, Riverside. Recuperado a partir de http://scholar.googleusercontent.com/scholar?q=cache:uV_OhGHeFk8J:scholar.google.com/yhl=esyas_sdt=0,5
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9-26. [http://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](http://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)

- Salcedo-Baca, D., Hinojosa, H. A., Mora-Aguilera, G., Covarrubias-Gutiérrez, I., De Paolis, F.J.R., Mora-Flores, J. S., y Cintora-González, C. L. (2010). *Evaluación del impacto económico del Huanglongbing (Huanglongbing) en la cadena citrícola mexicana*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). Recuperado a partir de <http://207.248.177.30/mir/uploadtests/31187.177.59.1.IICA%20Evaluacion%20Economic%20Huanglongbing.pdf>
- SENASICA. (2012, enero 30). Ficha Técnica Huanglongbing Huanglongbing. Recuperado 4 de noviembre de 2015, a partir de <http://www.senasica.gob.mx/?doc=1834>
- SENASICA. (2015, 09). Mapa Dinámico Fitosanitario. Recuperado 2 de noviembre de 2015, a partir de <http://www.sinavef.gob.mx/MDF/>
- SENASICA. (2016, junio 2). Situación fitosanitaria actual. Recuperado 2 de noviembre de 2015, a partir de <http://www.senasica.gob.mx/?id=4608>
- SENASICA. (2018, agosto 28). Situación fitosanitaria actual. Recuperado 28 de agosto de 2018, a partir de <http://sinavef.senasica.gob.mx/SIRVEF/Huanglongbing.aspx>
- SIAP. (2016, junio 2). SIAP – Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera » Cierre de la producción agrícola por cultivo. Recuperado 3 de febrero de 2016, a partir de <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/>
- Sutton, B., Yong-Ping, D., Halbert, S. E., Xiao-an, S., Schubert, T., y Wayne, D. (2005). H-11 Detection and Identification of Citrus Huanglongbing (Greening) in Florida, USA. Presentado en Proceedings of the International Citrus Canker and Huanglongbing Research Workshop.
- Texeira, D. C., Ayres, J., Kitajima, E. W., Danet, L., Jagoueix-Eveillard, S., Saillard, C., y Bové, J. M. (2005). First Report of a Huanglongbing-Like Disease of Citrus in Sao

Paulo State, Brazil and Association of a New Liberibacter Species, «*Candidatus* Liberibacter americanus», with the Disease. *Plant Disease*, 89(1), 107-107.
<http://doi.org/10.1094/PD-89-0107A>

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*, 96(1), 36–47.
<https://doi.org/10.1653/024.096.0105>

Xu, C. F., Xia, Y. H., Li, K. B., y Ke, C. (1988). Further study of the transmission of citrus Huanglongbing by a psyllid, *Diaphorina citri* Kuwayama. Presentado en In Proc. 10th Conference of the International Organization of Citrus Virologists, Riverside, California. Recuperado a partir de
<http://www.imok.ufl.edu/Huanglongbing/database/pdf/00000029.pdf>

IV. RECONVERSIÓN DE CULTIVOS RESULTADO DE LA PRESENCIA DEL CLas EN COLIMA, MÉXICO

RESUMEN

El estado de Colima es productor importante de limón, las afectaciones por efecto del “Huanglongbing” (Huanglongbing), ha ocasionado pérdidas en forma progresiva. Hasta el momento no se conoce cura y los productores han decidido realizar cambios en la dinámica de cultivos. El objetivo de este trabajo fue cuantificar los cambios, mediante análisis espacial (PR) y herramientas del sistema de información geográfica (SIG); se realizaron clasificaciones supervisadas de imágenes Landsat 7 y Landsat 8, comprobando un progresivo aumento en la sustitución de cultivos en los últimos cinco años. Hasta el momento se han sustituido alrededor de 5 000 ha de cítricos, lo que ha significado una reducción de 84,721.88 toneladas en el volumen de producción del limón mexicano y una pérdida de 302,636,729 pesos aproximadamente.

Palabras clave: *Citrus aurantifolia* (Christm.) Swing, citricultura, limón mexicano, Huanglongbing, clasificación supervisada, Landsat.

4.1 Introducción

La actividad citrícola en México es considerada la cuarta en importancia a nivel mundial, con una producción total de 6.1 millones de toneladas de fruta, por detrás de Brasil, China y Estados Unidos de América (FAOSTAT 2014). De acuerdo a la Dirección General de Sanidad Vegetal (DGSV) existen 549,000 ha de cítricos distribuidas en el país; que representan una producción de 7 millones de toneladas de fruta y una derrama económica de 10,206 millones de pesos (DGSV, 2010). A nivel nacional las especies de cítricos de mayor

importancia son la naranja dulce (63.6%), limón en todas sus especies (26.5%), mandarina (5.5%) y toronja (5.5%) (SIAP-SAGARPA, 2014).

Por la calidad de la fruta y la productividad, el estado de Colima es el principal productor de limón a nivel nacional e internacional (Velazquez-Monreal *et al.*, 2011), lo que se refleja en un valor del 18% del producto interno agrícola del Estado (Manzanilla-Ramírez *et al.*, 2010). Genera empleo para 3,593 productores que cultivan 25,014 ha, de donde se obtienen 500,000 ton anuales en promedio, el 60% de la producción genera la actividad de 26 empresas empacadoras, que comercializan el producto en el mercado nacional e internacional para consumo en fresco. El 40% restante se transforma en siete agroindustrias que producen aceites, jugos concentrados, clarificados y pectinas entre otros derivados; de donde dependen 20,000 familias de los municipios de Tecomán y Armería (Manzanilla-Ramírez *et al.*, 2010). El “Huanglongbing” (HLB), enfermedad de los brotes amarillos o “citrus greening” en inglés, es considerada la mayor amenaza para la citricultura en el mundo. Esta enfermedad fue descubierta en China hace más de 100 años a finales del siglo XIX, tiene como agente causal la bacteria gram negativa del género *Candidatus Liberibacter*. Existen tres especies *Candidatus Liberibacter africanus* (CLaf), *Candidatus Liberibacter americanus* (CLam) y *Candidatus Liberibacter asiaticus* (CLas), siendo esta última la más ampliamente distribuida en Asia y América; y que se presenta en México (Mora-Aguilera *et al.*, 2014; Garnier *et al.*, 2000; Bové 2006).

El Huanglongbing es una enfermedad que en condiciones naturales se transmite por los insectos liividos *Trioza erytrae* y *Diaphorina citri*. En México los síntomas inducidos por el CLas fueron la presencia de punteados cloróticos progresivos, moteado difuso hasta presentar manchas angulares asimétricas; una característica exclusiva de limon mexicano fue la defoliación generalizada de los árboles. La nervadura central mostro aclaramiento,

engrosamiento y acorchamiento (Esquivel-Chávez *et al.*, 2012, 2016), con el tiempo los síntomas se extienden a todo el dosel del árbol (Esquivel-Chávez *et al.*, 2012; Gómez, 2010; Gottwald *et al.*, 2007; Bové, 2006).

Hasta 2003, el *Candidatus Liberibacter* estuvo restringido a tres regiones geográficas: África, Península de Arabia y Asia (Bové, 2006). En el año de 2004 ocurrió el primer reporte de esta enfermedad en América en la localidad de Araracuara en Sao Paulo Brasil, donde se localizó la presencia de *Candidatus Liberibacter asiaticus* (Texeira *et al.*, 2005; Coleta-Filho *et al.*, 2004); posteriormente, en 2005 se confirmó su detección en Florida, E.U.A, en 2007 en Cuba y en 2008 en Lousiana, E.U.A.

En México el primer reporte de la enfermedad se dio en julio de 2009, en Tizimín Yucatán (SENASICA, 2012), por lo que se activó el plan de emergencia bajo la norma emergente NOM-EM-047-FITO-2009, con estas medidas se esperaba un avance gradual de la enfermedad de sur a norte del país; hecho que no ocurrió ya que en abril de 2010 se da el primer reporte de la enfermedad en árboles de limón mexicano en un huerto comercial en “El Ahijadero”, en el municipio de Tecomán, Colima (SAGARPA, 2010); y en poco menos de seis meses de la primera detección, el Comité Estatal de Sanidad Vegetal de Colima (CESAVECOL) reportó más de 1,200 plantas sintomáticas en más de 140 huertas comerciales en los municipios de Tecomán, Armería, Manzanillo y Coquimatlán, entre los límites de Michoacán y Jalisco.

Actualmente el CLas en el estado de Colima es endémico, puesto que se han detectado árboles sintomáticos en todas las zonas productoras de limón mexicano (Flores Sánchez, 2016; Robles-González *et al.*, 2013).

En Colima con base en la normatividad vigente y las experiencias en otras regiones cítricas de Estados Unidos de América y Brasil, las estrategias implementadas para el manejo del

Huanglongbing tienen el objetivo de retrasar la dispersión del CLAs para mitigar su impacto en huertas productivas y convivir con la enfermedad (SENASICA, 2012, 2016, 2018; Manzanilla-Ramírez *et al.*, 2010).

La presencia del Huanglongbing en lugares como Estados Unidos de América, Brasil y México originaron estudios de impacto potencial en la cadena citrícola de estos países, en ellos, se considera aspectos propios del cultivo, su manejo agronómico, variables epidemiológicas, además de los elementos económicos relacionados con la enfermedad (Mora-Aguilera *et al.*, 2016; Flores-Sanchez *et al.*, 2017).

Los estudios coinciden en que una de las consecuencias es el incremento en los costos de producción debido a las prácticas de manejo para prevenir la presencia del Huanglongbing (Galvão de Miranda *et al.*, 2012).

Un manejo sostenible desde el punto de vista agroecológico del Huanglongbing con fundamento epidemiológico requiere del entendimiento amplio del concepto de **población** y el principio de **contagio**, enfatizando en particular en la salud del **hospedante** que es el elemento integrador y lógico para definir e interpretar la estabilidad del sistema productivo en un contexto regional, adicionalmente debe de considerar la variación de intensidad epidémica debido a la susceptibilidad de las especies citricolas, la compactación citrícola y la carga del inóculo en la región (Mora-Aguilera *et al.*, 2014), por tanto entre las variables a considerar en el modelo de cuantificación están la evolución del tamaño del huerto, las pérdidas en la productividad y la producción obtenida.

La epidemiología desde este enfoque considera de importancia las poblaciones biológicas del hospedante (Vegetales de la familia de las Rutaceas), del vector (*Diaphorina citri*) y el patógeno (*Candidatus Liberibacter asiaticus*), que se constituyen en un universo de individuos con una estructura y función específica en el sistema con una delimitación espacial

y temporal. La proporción de individuos sanos, los visualmente sintomáticos, en proceso de incubación, en estado infeccioso, define la estructura sanitaria de la población del hospedante, de ahí que la planta sea la unidad biológica básica para modelar los cambios en la epidemia para caracterizarla de forma espacial y temporal (Mora-Aguilera *et al.*, 2014).

En Florida se determinó que uno de los efectos de la presencia del Huanglongbing fue la reducción en un 50% de nuevas plantaciones para 2011 y un incremento en los costos de producción hasta en un 33% (Spreen y Baldwin, 2013), por su parte en Colima la reducción del rendimiento de limón mexicano es dependiente de la severidad de la infección, observándose que cuando el porcentaje de la copa afectada es superior al 50%, los árboles no superan los 30 kg de rendimiento por año (Robles-González *et al.*, 2013).

En México en 2010 se realizaron estimaciones por parte del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) (Salcedo *et al.*, 2010), considerando la ausencia de CLAs y dos escenarios de establecimiento de la enfermedad; el primero de alta intensidad epidémica y distribución generalizada y, uno segundo de intensidad epidémica variable y distribución gradual en el país. En el primer escenario se determinó que el impacto potencial del Huanglongbing depende de la magnitud de la superficie sembrada y de los rendimientos, lo que ubica al estado de Colima con un riesgo de alto a moderado considerando pérdidas del orden de los 87,765 ton.

Estudios epidemiológicos de Huanglongbing desarrollados en el mundo (Spreen y Baldwin 2013, Galvão de Miranda *et al.*, 2012, Salcedo-Baca *et al.*, 2010) coinciden en que una de las variables principales es la magnitud de la superficie establecida de cítricos.

El monitoreo de la superficie sembrada de los cultivos tradicionalmente se realiza mediante censos, lo que resulta en procesos caros que consumen mucho tiempo y recursos humanos

(Martínez-Verduzco *et al.*, 2012). Una alternativa es el uso de técnicas indirectas como el de sensores remotos que contribuyen a obtener información de manejo de recursos naturales, delimitación y conservación de áreas, restauración ambiental, mapeo de riesgos naturales, desarrollo de comunidades, entre otros (Dunn, 2007).

Aplicaciones en agricultura de estas técnicas incluyen la clasificación de plantaciones de cocotero intercaladas con otros frutales como mango (*Mangifera indica* L.), membrillo de bengala (*Aegle marmelos*) y plátano (*Musa paradisiaca* L.), en el estado de Karala en India, donde imágenes multiespectrales fueron utilizadas para distinguir claramente cada una de las especies por el patrón de color exhibido (Dakshinamurti *et al.*, 1971). Ejemplos en México son los estudios de cambios de patrones espaciales de cobertura y uso del suelo en áreas cafetaleras de la sierra norte de Puebla (Evangelista *et al.*, 2010) o la discriminación de fincas de café (*Coffea arabica* L) bajo el sistema de sombreado de la vegetación natural en Cacahotán Chiapas (Martínez-Verduzco *et al.*, 2012). Por la importancia de la variable superficie sembrada del hospedante de CLAs en el análisis epidemiológico el presente trabajo planteó el objetivo de identificar los cambios en la dinámica de cultivos respecto a la superficie sembrada en la zona agrícola en los municipios de Tecomán y Armería, Colima; y describirla para el período de marzo de 2010 a abril de 2014; se utilizaron imágenes Landsat 7 (L7) “Enhanced Thematic Mapper Plus” (ETM+) y Landsat 8 (L8).

4.2. Materiales y métodos

Área de Estudio. El área de estudio (Figura 3) está comprendida en los límites geográficos de los municipios de Tecomán y Armería del estado de Colima con coordenadas al norte 19°31', al sur 18°41' de latitud norte; al este 103°29' y al oeste 104°41' de longitud oeste

(INEGI 2014). Es la Principal región productora de limón mexicano, con el 78.5% de los predios en el estado (Villagómez-Almanza *et al.*, 2010).

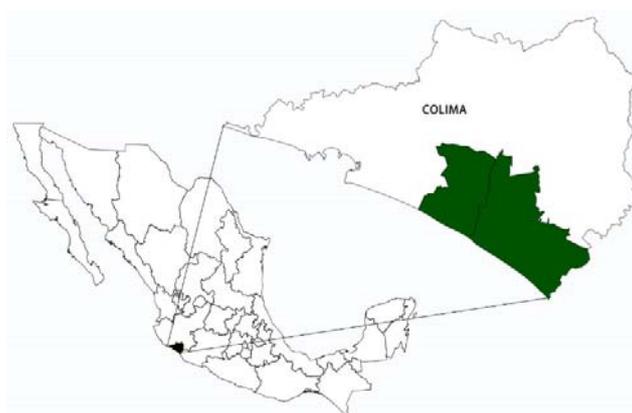


Figura 3. Área de Estudio, Municipios de Tecomán y Armería, Estado de Colima.

Procesamiento de imágenes: Se eligieron nueve imágenes Landsat del período enero de 2010 abril de 2014, que correspondieron a temporadas con baja precipitación para reducir la presencia de vegetación silvestre anual, que interfiere en la clasificación. Otro criterio fue buscar la menor presencia de nubes.

El pre procesamiento de las imágenes implicó la conversión de medidas de niveles digitales a porcentaje de reflectancia, procedimiento que permitió la corrección atmosférica por el método de calibración radiométrica del cuerpo negro. Para eliminar el efecto del rayado que presentan las imágenes Landsat 7 (Chen *et al.*, 2011) se utilizó el método aportado por el software ENVI, el bandeo afectó de manera mínima, debido a que la zona de estudio se ubica coincidentemente fuera del área de líneas.

La zona de estudio se delimitó a través de mapas vectoriales municipales disponibles a través de INEGI; se construyeron máscaras para las áreas que no presentan actividad agrícola, como

lomeríos y zonas de manglares, para eliminar la interferencia provocada en los resultados de la clasificación por la vegetación silvestre.

Procesamiento de imágenes: Para identificar las áreas con vegetación cultivada y aquellas con vegetación silvestre se realizó la composición de colores. Se utilizaron composiciones de color verdadero de bandas (3,2,1) y (4,3,2), distinguiéndose diferentes tipos de cobertura que ayudaron a precisar las zonas de estudio (Jensen, 2000).

El trabajo de campo consistió en seis muestreos de julio de 2011 a marzo de 2014, donde se tomaron datos en parcelas con la presencia de los cultivos de interés. Para todos los casos se registró su ubicación mediante GPS; en las huertas de limón también se registraron variables como especie, edad del huerto, vigor, fenología, presencia de plagas alternas (manejo), productividad, tipo de riego, incidencia y severidad del Huanglongbing. Las ubicaciones de las parcelas en campo sirvieron como polígonos de entrenamiento para los procedimientos de clasificación supervisada.

Las clasificaciones supervisadas se realizaron con el método de máxima similitud que arrojó los mejores resultados. Para validar los resultados de las clasificaciones obtenidas se construyeron las matrices de confusión y se realizó el análisis de los coeficientes de precisión general, se consideraron válidas aquellas superiores al 85% para las matrices de confusión y el coeficiente Kappa superior al 80%.

las clasificaciones se procesaron de forma analítica para obtener parámetros de superficies sembradas y el índice de densidad citrícola relativa (Salcedo-Baca *et al.*, 2010):

$CitAg = SupS/SupAgr$, donde:

$CitAg$ = Índice de densidad citrícola relativa de la especie citrícola i

$SupS$ = Superficie sembrada (hectáreas) por especie citrícola

SupAg=Superficie agrícola total a considerar

Los resultados de la clasificación supervisada se procesaron con las herramientas del Sistema de Información Geográfico QGis para determinar las áreas sustituidas durante el período de interés.

Finalmente se utilizaron los datos publicados por la SAGARPA en 2014 en relación a producción, rendimientos y valor de la producción, para la estimación de los impactos derivados de la sustitución de limón mexicano en la región de Tecomán y Armería.

4.3 Resultados y discusión

Análisis de la superficie agrícola total del área de estudio. La superficie agrícola existente en los municipios de Tecomán y Armería para el período 2010-2014 (Figura 4), muestra una reducción de 5,749 ha, que puede ser explicado por el crecimiento de zonas pobladas de los municipios de Tecomán, Armería y de la localidad de Cerro de Ortega Municipio de Tecomán. Otra causa es la diversificación de las actividades productivas que se observa en las imágenes de satélite analizadas, integrándose actividades como la piscicultura y el crecimiento de la agricultura protegida; esta última no implica en si una reducción de la superficie agrícola, pero si una profunda transformación en las actividades agrícolas de la región.

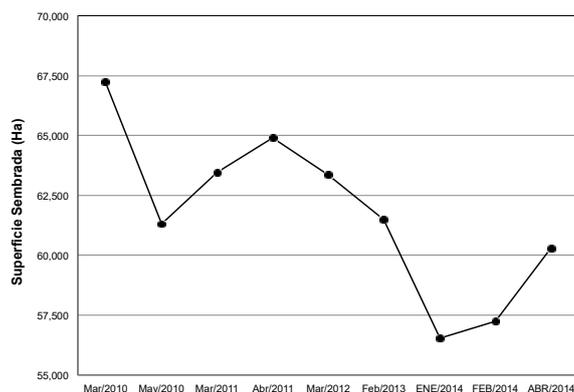


Figura 4. Variación de la superficie agrícola total de los municipios de Tecomán y Armería, Colima del año 2010-2014.

Cultivos de mayor importancia en la zona de estudio. Las zonas agrícolas de los municipios de Tecomán y Armería, concentran el 78% de la producción de limón de Colima (Villagómez-Almanza *et al.*, 2010). Los cultivos observados de mayor importancia de acuerdo a la superficie sembrada en estos municipios son: limón mexicano, cocotero (*Cocos nucifera* L.), caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.), plátano (*Musa paradisiaca* L.), papaya (*Carica papaya* L.), piña (*Ananas comosus* L.) y mango (*Mangifera indica* L.); también se encuentran cultivos anuales como maíz (*Zea mayz*), sorgo (*Sorghum bicolor* L.) y hortalizas en superficies reducidas (Figura 5).

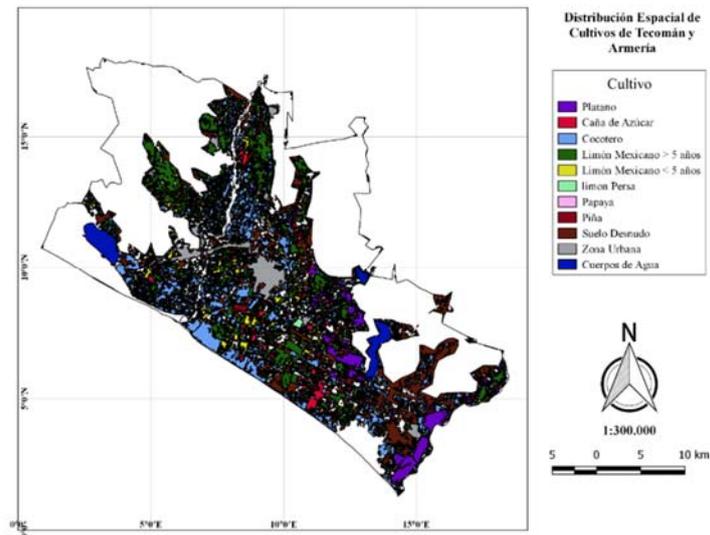


Figura 5. Cultivos de mayor importancia en la zona de estudio

Las escenas procesadas indican una alta fragmentación de la tierra que confiere características especiales a los procesos agrícolas de la región, una mayor diversidad de cultivos y por consecuencia heterogeneidad en las prácticas agronómicas. A pesar de esta fragmentación de parcelas se encuentra una gran continuidad de las huertas de limón, lo que influyó a el rápido establecimiento de *D. citri* debido a la disponibilidad del hospedante (Mora-Aguilera et al., 2016; Robles-González *et al.*, 2013).

El limón es el cultivo más extendido (Figura 6), ocupa amplias zonas en la planicie costera de los municipios de Tecomán y entre los lomeríos de Armería, por su densidad puede considerarse como un monocultivo, sólo interrumpido por pequeñas superficies otros cultivos como coco, caña de azúcar, plátano, papayo entre otros.

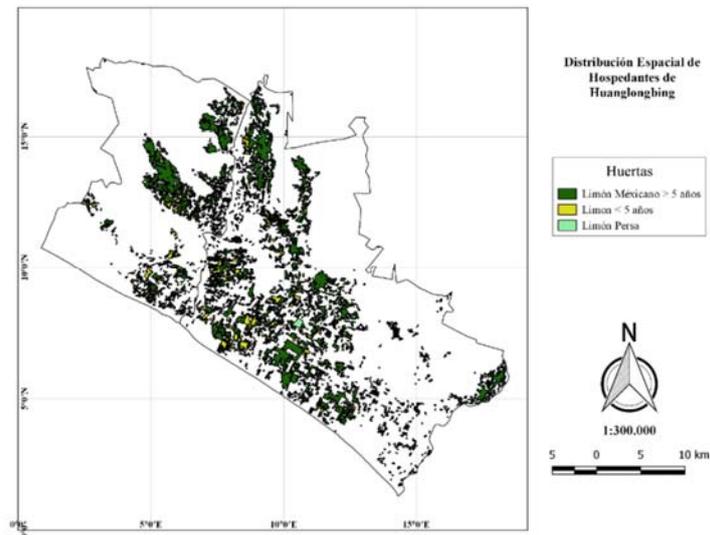


Figura 6. Disposición espacial de huertas de las diferentes especies de limón en los municipios de Tecmán y Armería (2014)

Las zonas urbanas pueden considerarse las barreras físicas de mayor importancia para la continuidad citrícola, aunque existen al sur importantes superficies del cultivo de plátano ubicado en las riberas del río Coahuyana. La ciudad de Tecmán delimita subregiones agrícolas, encontrándose huertas de limón a lo largo y ancho de la zona de estudio, sin un patrón específico en conglomerados amplios y continuos.

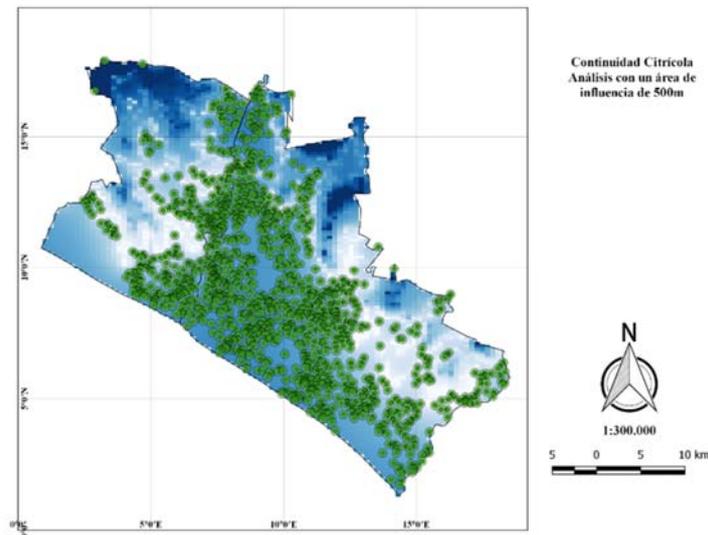


Figura 7. Delimitación de áreas de influencia de las huertas de limón en un radio de 500 m.

El análisis de área de influencia a partir de los centroides de las huertas, considerando un radio de 500 m, dió por resultado una alta disponibilidad de hospedantes para *D. citri* (Figura 7), es decir, que las poblaciones del vector pueden desplazarse libremente por la zona, sin encontrar barreras físicas. *D. citri* puede moverse de 500 m a 1000 m en días soleados y sin viento, aunque se han documentado movimientos extraordinarios en México de 29 a 80 km a partir de un foco (Flores-Sanchez *et al.*, 2011). Estos resultados concuerdan con lo reportado que indica que el vector se estableció rápidamente en la región con una rápida diseminación del CLas, donde una vez encontrado el primer brote el Comité Estatal de Sanidad Vegetal de Colima (CESAVECOL) detectó más de 1,200 plantas sintomáticas en alrededor de 140 huertas comerciales en los municipios de Tecomán, Armería, Manzanillo y Coquimatlán Huanglongbing (Flores-Sanchez *et al.*, 2017; Manzanilla-Ramírez *et al.*, 2011).

El cocotero, es el segundo cultivo en relevancia y se encuentra establecido primordialmente en las cercanías de las costas. Este hecho es importante, por la práctica común de asociación de cocotero con limón, por lo que el valor inductivo de inóculo debe ser considerado en el análisis epidemiológico del sistema epidemiológico asociado a Huanglongbing.

Otros cultivos de menor importancia son la caña de azúcar que se encuentra por todo el municipio, sin embargo, las superficies mayores se ubican en las planicies costeras del municipio de Tecomán.

Recientemente se ha presentado la introducción de cultivos como la piña, la papaya que ha incrementado su superficie en el período 2010-2014; su distribución es aleatoria por la planicie costera y en pequeñas superficies. Otra especie perenne de poca importancia es el mango que ocupa áreas reducidas y dispersas.

Superficie sembrada. Para el año 2010 en los municipios de Tecomán y Armería existían aproximadamente 67,000 ha dedicadas a la actividad agrícola, de las cuales, alrededor de 20,000 ha estaban dedicadas al cultivo de limón mexicano. Esta situación se había mantenido relativamente estable debido a que el limón mexicano es un cultivo perenne y de alta rentabilidad.

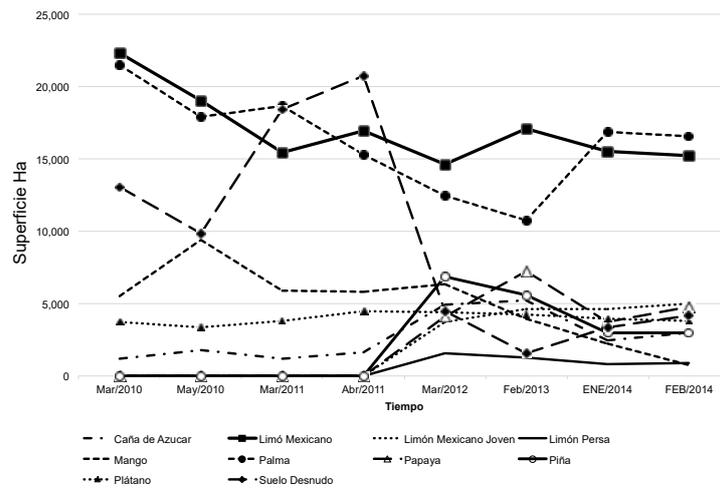


Figura 8. Superficie sembrada de los principales cultivos para la región de Tecomán y Armería, Colima.

La dinámica de los cultivos ha sufrido importantes cambios, (Figura 8). En 2010 a partir de la aparición y establecimiento del CLAs, se calcula una sustitución de superficie sembrada de limón mexicano por otros cultivos en un orden de las 5,000 ha. Por otra parte, ocurrió la plantación de nuevas huertas de cítricos, en un orden de 4,000 ha hasta 2014. Un incremento marginal de dio con limón persa que registró alrededor de 600 ha de reciente establecimiento. La tendencia de reducción de la superficie establecida de limón mexicano se acentuó durante los primeros dos años posterior de la aparición del Huanglongbing, donde rápidamente se pasa del orden de las 20,000 ha a las 15,000 ha. Esto se explica por la rápida explosión de la epidemia superando rápidamente el umbral económico por lo que los protocolos de erradicación se vieron limitados (Robles-González *et al.*, 2013). El análisis de las imágenes permite observar que los casos de eliminación de huertas completas, se dio principalmente en huertas jóvenes con producciones aún nulas o mínimas.

A partir de 2013 la tendencia abrupta de disminución se estabilizó, quedando la superficie de cítricos en el orden de las 15,000 ha, hecho que puede ser atribuible a los programas de las

organizaciones involucradas en la campaña del Huanglongbing, que han coadyuvado a la toma de experiencia en la convivencia con la enfermedad con el objeto de minimizar los impactos por la presencia del CLAs (Flores Sánchez, 2016; Mora-Aguilera *et al.*, 2016)

Existen huertas con incidencia del 100% de la enfermedad (Flores Sánchez, 2016), por ello a mediano y largo plazo será inevitable la sustitución gradual de los huertos infectados por Huanglongbing. Cultivos como plátano, caña de azúcar, mango, cocotero; o cultivos anuales o bien con cultivos emergentes como la papaya y piña se constituyen en alternativas viables. Una segunda opción es continuar con el cultivo de limón, con las implicaciones derivadas de la presencia del Huanglongbing en la región y bajo modelos estrictos de rentabilidad y replante.

Cualquiera decisión tiene implicaciones directas en la epidemiología del Huanglongbing, por un lado, el cambio de cultivos dará como resultado una reducción en el índice de abundancia citrícola, es decir, la disponibilidad de plantas hospedantes se vería disminuida y por consiguiente un cambio en las condiciones de dispersión del CLAs, debido a que la continuidad del hospedante sugiere mayor posibilidad de éxito en el proceso epidémico (Mora-Aguilera *et al.*, 2016; SENASICA-DGSV, 2012).

La decisión de una nueva plantación de cítricos implicaría en contraste la disponibilidad de hospedantes susceptibles (SENASICA-DGSV, 2012), por lo que requerirán de un manejo intensivo.

Los cultivos secundarios, presentan una marcada reducción de superficie establecida, el cocotero por ejemplo pasó de las 20,000 ha a 10,000 ha, tendencia quizá influenciada por la práctica de asociación del cultivo con limón mexicano.

El cálculo del índice de densidad citrícola relativa (Figura 9) sugiere el área inductiva de la epidemia (Salcedo-Baca *et al.*, 2010), para el caso de Tecomán y Armería se observa que

este índice se redujo hasta en un 6% en promedio desde 2010 hasta abril de 2014. Es necesario considerar que para el caso de plantaciones nuevas este índice se incrementó en un punto porcentual, ya que la susceptibilidad del limón mexicano en plantas jóvenes mostró un alto potencial inductivo en el estado de Colima (Esquivel-Chavés, 2012; Flores-Sánchez, 2016), lo que contrasta respecto en otras partes del mundo (Bazzanessi 2011).

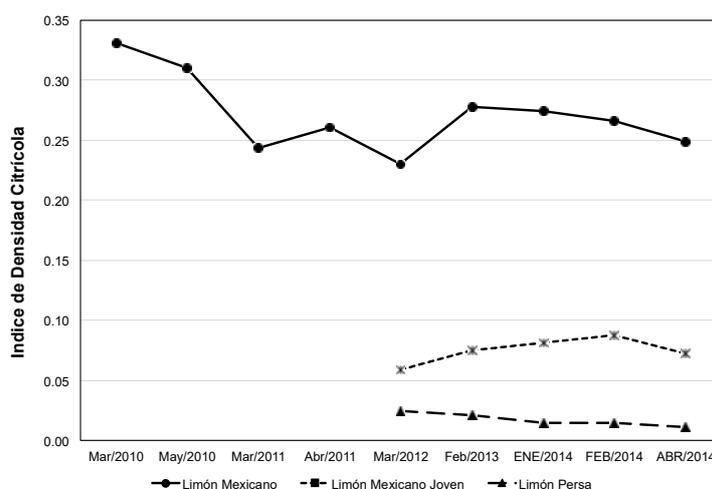


Figura 9. Índice de densidad citrícola relativa a la superficie sembrada para el área de estudio.

Una cuantificación de la pérdida de productividad originada por la reducción de la superficie establecida se puede calcular con los datos de rendimiento y valor de la producción reportados por el SIAP (2014). El cálculo indica que en promedio se han dejado de producir 84,721.88 ton de fruta, lo que significa una disminución en promedio de \$302,636,729.84 pesos mexicanos (\$30 millones de dólares). Estos datos coinciden de manera cercana a los obtenidos por Salcedo-Baca (2010), en las proyecciones bajo un escenario de alta incidencia epidémica, que fue el caso para Colima.

4.4 Conclusiones

La presencia del Huanglongbing en la región limonera de Tecomán y Armería a partir de 2010 ha implicado una fuerte presión para el mantenimiento y productividad de huertas de limón mexicano, debido a la rápida dispersión y endemicidad que tuvo CLas causante del Huanglongbing.

Existe una tendencia a la disminución en la sustitución de huertas de limón, ocasionado por la decisión de los agricultores de minimizar los impactos de la presencia del Huanglongbing debido a que el limón mexicano es un cultivo altamente redituable y con gran importancia social, que brinda un alto número de empleos a lo largo de toda su cadena productiva.

Los agricultores han adoptado la decisión de renovar las plantaciones de limón, lo que hace necesario el fortalecimiento de los sistemas de monitoreo permanente de CLas y su vector, para contar con información que permita tomar las medidas de manejo que ayuden a mitigar al mínimo las condiciones favorables de dispersión de la bacteria causante de HLB y a establecer modelos de producción basados en rentabilidad y renovación del cultivo.

Bibliografía consultada

Bazzanesi-Beozzo, R. 2011. Epidemiology of Huanglongbing and its implications on disease management. Segundo taller internacional sobre plagas cuarentenarias de los cítricos. Colima, México.

Bové, J. M. 2006. "Huanglongbing: A destructive, newly-emerging, century-old disease of citrus". J. Plant Pathol. 88(1):7-37.

Chen, J., Z. Xiaolin, E. James, G. Feng, J. Summing. 2011. "A simple and effective method for filling gaps in Landsat ETM + SLC-off images". Remote Sens Environ. 115:1053-1064. kshinamurti, C., Krishnamurthy, B., Summanwar, A. S., Shanta, P.,

- Pisharoty, P.R. 1971. Remote sensing for coconut wilt. In: Proceedings of international symposium on remote sensing of environment, vol 1. Ann Arbor, MI. pp. 25-29.
- Coletta-Filho, H. D., Targon, M. L. P. N., Takita, M. A., De Negri, J. D., Pompeu, J., Machado, M. A., ... Muller, G. W. (2004). First Report of the Causal Agent of Huanglongbing (“*Candidatus Liberibacter asiaticus*”) in Brazil. *Plant Disease*, 88(12), 1382-1382. <https://doi.org/10.1094/PDIS.2004.88.12.1382C>
- Dakshinamurti, C., Krishnamurthy, B., Summanwar, A. S., Shanta, P., y Pisharoty, P. R. (1971, May). Remote sensing for coconut wilt. In *Proceedings of the Seventh International Symposium on Remote Sensing* (Vol. 1, pp. 25-29).
- Dunn, C. E. 2007. “Participatory GIS – a people’s GIS?” *Progress in Human Geography*. 31(5): 616-637.
- Esquivel Chávez, F. (2016). Dinámica de la concentración bacteriana de *Candidatus Liberibacter asiaticus* y su efecto en la expresión sintomática e histológica en cítricos agrios y dulces e implicaciones en el potencial de inóculo. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados, Montecillos. Estado de México. 165 p.
- Esquivel-Chávez, F., G. Valdovinos-Ponce, G. Mora-Aguilera, R. Gómez-Jaimes, J. J. Velázquez-Monreal, M. A. Manzanilla-Ramírez, J.L. Flores-Sánchez, J. I. López-Arroyo. 2012. Análisis Histológico foliar de cítricos agrios y naranja dulce con síntomas ocasionados por *Candidatus Liberibacter asiaticus*. *Agrociencia*. 46(8): 769-782.
- Evangelista Oliva, V., López-Blanco, J., Caballero Nieto, J., y Martínez Alfaro, M. Á. (2010). Patrones espaciales de cambio de cobertura y uso del suelo en el área

- cafetalera de la sierra norte de Puebla. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, (72), 16.
- FAOSTAT. 2014. Producción de Limón Mexicano en México. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)- For a world without hunger. En línea: http://faostat3.fao.org/home/index_es.html?locale=es#VISUALIZE: consultado el 25 de julio de 2014.
- Flores Sánchez, J. L. (2016). Epidemiología del HLB bajo tres escenarios regionales en México. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados, Montecillos. Estado de México. 289 p.
- Flores-Sanchez, J., Mora-Aguilera, G., Loeza-Kuk, E., López-Arroyo, J. I., Gutierrez Espinosa, M. A., Dominguez-Monge, S., ... Robles-García, P. (2017). Diffusion model for describing the regional spread of Huanglongbing from first-reported outbreaks and basing an area wide disease management strategy. *Plant Disease*, 101. <https://doi.org/10.1094/PDIS-04-16-0418-RE>
- Galvão de Miranda, S.H., A. C. Oliveira Adami, R. Bassanezi Beozzo. 2012. Economic impacts of Huanglongbing disease in Sao Paulo State. International Association of Agricultural Economists Triennial Conference, Foz do Iguacu, Brazil, August.
- Gottwald, T., da Graça, J., y Bassanezi, R. (2007). Citrus Huanglongbing: The Pathogen and Its Impact. *Plant Health Progress*. <http://doi.org/10.1094/PHP-2007-0906-01-RV>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Catálogo Único de Claves de Áreas Geoestadísticas Estatales, Municipales y Localidades: en línea: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geoestadistica/catalogoclaves.aspx>. consultado el 5 de agosto de 2014.

- Jensen R. John, 2000. Remote sensing of the environment: An earth resource perspective. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA. p. 544.
- Manzanilla-Ramirez M.A., J.J. Velázquez-Monreal, M.M. Robles-González, M. Orozco-Santos, S.H Carrillo-Medrano, V.M. Medina-Urrutia. 2011. Efecto de aspersiones regionales sobre poblaciones de *D. citri* en el Estado de Colima. VI Simposium Internacional cítrícola. Tecomán, Colima.
- Manzanilla-Ramírez, M. A, M.M. Robles-González, J.J. Velázquez-Monreal, M. Orozco-Santos, V.M. Medina-Urrutia. 2010. Programa en el manejo del Huanglongbing en limón mexicano para el estado de Colima, Segundo taller internacional de plagas cuarentenarias de los cítricos. Colima.
- Martínez-Verduzco, G., M. Galeana-Pizaña, G. Cruz-Bello. 2012. Coupling community mapping and supervised classification to discriminate shade coffee from natural vegetation, *Appl Geogr.* 34: 1-9.
- Mora-Aguilera, G., Acevedo-Sánchez, G., Flores-Sanchez, J., González-Gómez, R., y Robles-García, P. (2013). Applied Epidemiology to Plant Disease Risk Analyses.
- Mora-Aguilera, G., P. Robles-García, López-Arroyo, J. I., Flores-Sánchez, J., Acevedo-Sánchez, G., Domínguez-Monge, S., ... González-Gómez, R. (2014). Situación Actual y Perspectivas del Manejo del Huanglongbing de los Cítricos. *Revista mexicana de fitopatología*, 32(2), 108-119.
- Mora-Aguilera, G., Robles-García, G., López-Arroyo, J. I., Flores-Sánchez, J., Acevedo-Sánchez, G., & E González-Gómez, L.-K. (2016). Situación Actual y Perspectivas del Manejo del HLB de los Cítricos Current situation and Perspectives for Management of Citrus HLB. *Revista mexicana de fitopatología*, 32, 108–119.

Robles-González, M. M., J.J. Velázquez-Monreal, M. A. Manzanilla-Ramírez, M. Orozco-Santos, V. M. Médina-Urrutia, J. I. López-Arroyo, y R. Flores-Virgen. 2013. Síntomas del Huanglongbing (Huanglongbing) en árboles de limón mexicano [*Citrus aurantifolia* (Christm) Swingle] y su dispersión en el estado de Colima, México, 19(1) pp. 15-31.

Salcedo-Baca, D., R. A. Hinojosa, G. Mora-Aguilera, I. Covarrubias-Gutiérrez, F.J.R. De Paolis, J.S. Mora-Flores, C. L. Cintora-González. 2010. Evaluación del impacto económico del Huanglongbing (Huanglongbing) en la cadena citrícola mexicana. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), México. pp. 5-78.

<http://www.iica.int/Esp/regiones/norte/mexico/Publicaciones%20de%20la%20Oficina/B2009e.pdf>

SAGARPA, y Arriaga, D. J. T. (2010). Protocolo de actuación para la detección de Huanglongbing, (1), 39. Disponible en línea : <http://publico.senasica.gob.mx/?doc=9364>

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). 2009. Norma Oficial Mexicana de Emergencia NOM-EM-047-FITO-2009. Por lo que se establecen las acciones fitosanitarias para mitigar el riesgo de introducción y dispersión del Huanglongbing (Huanglongbing) de los cítricos (*Candidatus Liberibacter spp.*) en el territorio nacional. <http://www.senasica.gob.mx/?doc=14986>

Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria-Dirección General de Sanidad Vegetal (SENASICA-DGSV). 2012. Ficha Técnica de Huanglongbing

- Huanglongbing. Disponible en Línea: [<http://www.senasica.gob.mx/?id=4609>], consultado el 10 de noviembre de 2014.
- SENASICA. (2015, 09). Mapa Dinámico Fitosanitario. Recuperado 2 de noviembre de 2015, a partir de <http://www.sinavef.gob.mx/MDF/>
- SENASICA. (2016, junio 2). Situación fitosanitaria actual. Recuperado 2 de noviembre de 2015, a partir de <http://www.senasica.gob.mx/?id=4608>
- SENASICA. (2018, agosto 28). Situación fitosanitaria actual. Recuperado 28 de agosto de 2018, a partir de <http://sinavef.senasica.gob.mx/SIRVEF/HLB.aspx>
- SIAP .2014. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. En línea: http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=170&Itemid=80 . Consultado el 4 de Agosto de 2014.
- Spreen, T. H., and J. P. Baldwin. 2013. The impact of Huanglongbing (Huanglongbing) on citrus tree planting in Florida. Southern Agricultural Economics Association, Annual Meeting. Orlando Florida.
<http://ageconsearch.umn.edu/bitstream/142706/2/Spreen-Baldwin.pdf>
- Texeira, D. C., Ayres, J., Kitajima, E. W., Danet, L., Jagoueix-Eveillard, S., Saillard, C., y Bové, J. M. (2005). First Report of a Huanglongbing-Like Disease of Citrus in Sao Paulo State, Brazil and Association of a New Liberibacter Species, «*Candidatus Liberibacter americanus*», with the Disease. *Plant Disease*, 89(1), 107-107.
<http://doi.org/10.1094/PD-89-0107A>
- Velázquez-Monreal, J. J., M. M. Robles-González, M. A. Manzanilla-Ramírez, S. E. Carrillo-Medrano, y M. Orozco-Santos. 2011. Dinámica poblacional de *Diaphorina citri* KUWAYAMA (HEMIPTERA: PSYLLIDAE) en el estado de Colima. 2º Simposio

Nacional Sobre Investigación para el Manejo del Psilido Asiático de los Cítricos y el Huanglongbing en México. Montecillos, Estado de México.

<http://www.senasica.gob.mx/?doc=22601>

Villagómez-Almanza, J., G. Reyes-Martínez, y S. Díaz-González. 2010. Plan estratégico para mitigar el impacto del Huanglongbing (Huanglongbing) sobre la citricultura del estado de Colima. Consejo Estatal de Productores de Limón de Colima, A.C. VI simposio internacional de cítrica y 1er simposio internacional sobre mejoramiento genético de cítricos. Tecomán, Colima, México. pp 74-91.

<http://colimaproduce.net/SIMPOSIO/archivos/DIPOSITIVA4.pdf>

V. EVALUACIÓN DEL HUANGLONGBING EN CAMPO Y CREACIÓN DE BASE DE DATOS ESPACIAL PARA EL ANALISIS EPIDEMIOLÓGICO DEL SISTEMA EPIDEMIOLÓGICO ASOCIADO A HUANGLONGBING EN COLIMA.

5.1 Introducción

La construcción de una base de datos espacial para el diagnóstico epidemiológico del Huanglongbing en limón mexicano de los municipios de Tecomán y Armería en Colima. Se plantea el enfoque del análisis epidemiológico, entendido como el estudio de las poblaciones de las plantas, del patógeno y sus vectores; además de las interacciones que se establecen entre los factores biológicos y ambientales; considerando también la intervención del hombre (Kranz 1974, Agrios, 2005). El objetivo es caracterizar la epidemia y sus implicaciones a nivel espacial y temporal (Kirby, Delmelle, y Eberth, 2017), es decir, conocer la dinámica de cambio del patógeno (Agrios, 2005), mediante procedimientos fitopatológicos, ecológicos y matemáticos (Mora-Aguilera *et al.*, 2013, 2014).

La epidemia de Huanglongbing en los sistemas agrícolas de limón mexicano representa un fenómeno de desequilibrio biológico, con implicaciones ambientales y productivas. Para su comprensión se plantea el análisis integral de la unidad productiva de la parcela, en un enfoque regional, que aporte la comprensión y planteamiento de esquemas posibles de manejo, por medio de la caracterización cuantitativa de los componentes del sistema epidemiológico, lo anterior en la comprensión de que el conocimiento de la dinámica temporal y espacial de los componentes de la epidemia es crucial para este objetivo (Mora-Aguilera *et al.*, 2013, 2014; Fitt, McCartney, y West, 2006); por tanto el objetivo de la base de datos será proporcionar información oportuna y confiable para coadyuvar a minimizar los impactos en la salud del sistema agrícola a través del manejo de la enfermedad, que tiene

como propósito eliminar o reducir el inoculo inicial, reducir la tasa de infección y reducir la interacción patógeno-hospedante para reducir la severidad (Nutter, 2007).

Para realizar lo anterior es indispensable conocer el sistema productivo en un enfoque saludable y posteriormente las alteraciones originadas por el patosistema (Mora-Aguilera *et al.*, 2013).

Desde el punto de vista del análisis de datos y con el objetivo de establecer procesos epidemiológicos cuantitativos, es necesario identificar que los componentes de una epidemia son: una planta hospedera susceptible, un patógeno virulento, condiciones ambientales favorables en un período relativamente prolongado de tiempo y la intervención del hombre (Mora-Aguilera *et al.*, 2013; Agrios, 2005), por otra parte la epidemiología espacial integra a este análisis la perspectiva espacial, para el diseño y tratamiento de los componentes del sistema epidemiológico (Kirby *et al.*, 2017). La integración de estas componentes constituyen el sistema epidemiológico que se analiza comúnmente en el tetraedro de la epidemiología (Agrios, 2005) o en un sistema abierto con la planta como eje central e integrador (Mora-Aguilera *et al.*, 2013, 2014). En esta perspectiva es lógico establecer que la compilación de datos tomar como base los elementos del sistema epidemiológico, que deben ser monitoreados, muestreados y registrados por las personas ligadas al sistema producto de limón mexicano. Existen, por tanto, variables que son medidas directamente por técnicos en campo como la incidencia, severidad, producción entre otras. Otras deben ser deducidas a partir de variables observadas en campo y otras como las variables físicas se toman de estaciones meteorológicas.

Almacenar y procesar información espacial regional implica grandes volúmenes de datos por lo que es necesario el uso de bases de datos espaciales para obtener información y apoyar la toma de decisiones por parte de los técnicos y agricultores (Sumathi y Esakkirajan, 2007).

Un elemento crítico en la toma de decisiones por parte de los técnicos e investigadores dedicados a definir y aplicar las estrategias de control para el Huanglongbing es la accesibilidad oportuna de datos confiables, que permita obtener a través de procesos analíticos información que justifique la toma de decisiones o plantee escenarios de posibles ocurrencias de fenómenos contingentes.

Una base de datos aunque puede contener información útil para muchos contextos, se diseña con objetivos específicos, por lo tanto, requiere de un equipo que interprete de manera adecuada las necesidades de información del problema a solucionar, un diseño cuidadoso del esquema lógico de solución es eje central para conseguir los objetivos planteados (Yeung y Hall, 2007b)

El manejo y análisis del patosistema Limón mexicano-CLas y sus interacciones epidemiológicas es un proceso complejo (Flores-Sánchez *et al.*, 2016, 2017; Mora-Aguilera *et al.*, 2014; Fitt *et al.*, 2006), por lo que requiere, la intervención de profesionales de diferentes áreas de conocimiento, para establecer e interpretar las relaciones causales de los fenómenos biológicos que se establecen en el sistema epidemiológico. Un objetivo importante es transformar los resultados en esquemas lógicos de almacenamiento de datos (Date, 2008; Sumathi y Esakkirajan, 2007; Yeung y Hall, 2007a) que provean a través de su procesamiento la información necesaria para el manejo adecuado del Huanglongbing.

La importancia de la actividad citrícola desde el punto de vista económico y social justifica la necesidad de buscar soluciones prácticas para el problema que significa el Huanglongbing en el estado de Colima (Flores-Virgen *et al.*, 2010), además de que esta experiencia puede ser el punto de arranque de aplicaciones que se desarrollen en contextos de mayor amplitud.

La información espacial tradicionalmente se ha enfocado a través de aplicaciones de Sistemas de Información Geográficos (SIG), donde se incluye la gestión de datos espaciales, la cartografía y el análisis espacial. Por otro lado, la epidemiología espacial ubica como aspectos de interés los mapas de dispersión del patógeno, análisis de correlación geográfica, gradientes de dispersión, evaluación del riesgo en relación con los focos (Flores-Sánchez *et al.*, 2016, 2017; Mora-Aguilera *et al.*, 2014; Kirby *et al.*, 2017).

Una conceptualización moderna ubica en el centro de este enfoque cuatro aspectos funcionales de la información espacial denominados: el sistema de base de datos, cartografía, comunicación y análisis espacial, cada una de las cuales sirve para una o más aplicaciones específicas, pero que están relacionadas. El componente de la base de datos espacial juega un rol central y crítico en el nuevo enfoque de la información espacial (Sumathi y Esakkirajan, 2007).

Típicamente las aplicaciones de información espacial implican datos y procesos de cómputo intenso, requieren de almacenamiento de un gran volumen de datos tradicionales (alfanumérico) y no tradicionales (objetos geométricos, imágenes y series de tiempo). Un sistema típico de base de datos espacial se ve reforzada por la capacidad de manipular nuevos tipos de datos y modelos, estructuras de datos complejas, algoritmos sofisticados y operadores para el procesamiento de datos eficiente. Como se señaló anteriormente, estas

capacidades están muy lejos de los enfoques basados en archivos convencionales de GIS que dominaron el mundo de los datos espaciales en la década de 1990 (Yeung y Hall, 2007b).

5.2 Diseño conceptual de la base de datos

El diseño y la implementación de la tecnología de la información espacial depende en gran medida de las tendencias que han caracterizado a la tecnología de la información (TI), los conceptos y técnicas utilizados actualmente en los sistemas de bases de datos espaciales son extraídos en gran parte de los principios y métodos de sistemas de bases de datos desarrollados en la década pasada (Yeung y Hall, 2007b).

El modelo de datos es la descripción conceptual de la base de datos, no incluye por tanto, ninguna referencia a la disposición física, o estructura, de la propia base de datos (Sumathi y Esakkirajan, 2007). La capacidad de un sistema de base de datos para satisfacer los objetivos previstos en la solución de un problema, depende de su diseño, para ello se usan varios modelos generados en diferentes etapas del proceso de desarrollo de base de datos (Date, 2008).

Para el diseño lógico de la base de datos se siguió el modelo de datos relacional que ha integrado de manera exitosa las necesidades de las bases de datos modernas donde se combinan datos alfanuméricos y espaciales.

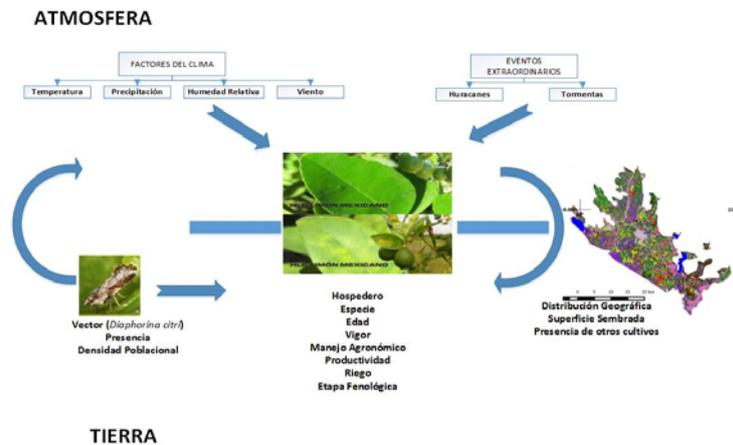


Figura 10. Modelo descriptivo simplificado del sistema epidemiológico limón mexicano-CLas

El objetivo principal de la base de datos propuesta es ser el repositorio para generar la información necesaria para la obtención de datos y mapas de la abundancia del hospedante; y el análisis espacial del riesgo de dispersión de Huanglongbing en la región productora de limón en el estado de Colima.

El planteamiento de la solución se realiza con base en el análisis del sistema epidemiológico asociado al Huanglongbing con el objetivo de determinar los cambios de intensidad epidémica con fundamento en la dinámica de las poblaciones del hospedante, vector y patógeno con los factores que actúan sobre ellas incluyendo los agronómicos (Fitt *et al.*, 2006).

Se establece como eje determinar en cantidad y espacio las huertas de cítricos existentes en la región, debido a que es el hospedante de interés económico más importante para la bacteria causante del Huanglongbing. Respecto al hospedante es necesario conocer la superficie cultivada en la región, su distribución espacial, como elementos condicionantes para el establecimiento y dispersión del CLas.

VARIABLES DEL HOSPEDANTE QUE MODIFICAN LA EXPRESIÓN DE LA ENFERMEDAD SON LA ESPECIE DE CÍTRICOS QUE SE ESTABLECE, PORTA INJERTO Y LA EDAD DE LA PLANTACIÓN, RESPECTO A LA ESPECIE SE SABE QUE LOS SÍNTOMAS SON DEPENDIENTE DE CADA REGIÓN AGRÍCOLA, ENCONTRÁNDOSE IMPORTANTES DIFERENCIAS ENTRE LO OBSERVADO EN DIFERENTES PARTES DEL MUNDO COMO BRASIL, EU Y ASIA (Esquivel-Chávez *et al.*, 2012, 2014). La edad por su parte se convierte en una variable destacada debido a que las condiciones fisiológicas de la planta varían con respecto a la edad de las plantas, presentando mayor susceptibilidad los huertos jóvenes (Robles-González *et al.*, 2011; SENASICA, 2016).

Otras variables de importancia relacionadas con las condiciones de manejo agronómico de las unidades de producción por parte de los productores son tipo de riego, nutrición, etapa fenológica, manejo agronómico, vigor de la planta y productividad.

Un segundo elemento en el sistema epidemiológico son las relaciones que se originan a través del patógeno, para el caso del Huanglongbing se relacionan a la bacteria como agente causal de la enfermedad. Un papel relevante es *D. citri* vector natural de la bacteria, medio por el cual se dispersa CLas de árbol en árbol, entre regiones y países (SENASICA, 2016; Santivañez *et al.*, 2013).

El análisis epidemiológico considera al hospedante para monitorear al agente causal y al vector a través de las variables epidemiológicas incidencia y severidad. La incidencia es el primer factor a considerar, esta variable es crítica en el procesamiento de datos, debido a la naturaleza destructiva de la bacteria, el encontrar una huerta positiva implica el hecho de delimitar un foco de posible dispersión de la enfermedad (Flores-Sánchez *et al.*, 2017).

La severidad es la variable que permite monitorear el grado de progreso que ha alcanzado la enfermedad en el árbol y en la huerta, es decir, define la cantidad de inóculo disponible e implicado en el riesgo de dispersión.

La densidad poblacional de *D. citri* a través del ciclo de desarrollo de los árboles de una huerta es otro factor detonante de los riesgos de dispersión, la variable está condicionada por el entorno físico y por la disponibilidad de árboles hospedantes (Flores-Sanchez 2017; Robles-González *et al.*, 2011).

Otro elemento del sistema epidemiológico lo conforman los aspectos físicos del clima, destacándose por su importancia los factores de altitud como limitante del desarrollo del vector, la temperatura que puede convertirse en promotor o limitante del desarrollo poblacional de *D. citri* y la humedad relativa que en altos porcentajes induce mortalidades importantes del vector (Torres-Pacheco *et al.*, 2013; Hall *et al.*, 2011; Aubert, 1987)

Finalmente, es necesario considerar en el sistema epidemiológico la acción de los productores a través de su práctica agronómica, que modifican de manera importante la forma en que se expresa el patógeno con acciones como cambio de cultivo, tipo de riego, fertilización, control de plagas, que redundan en los niveles de productividad obtenidos y en la decisión de mantener o no el sistema productivo de limón mexicano.

El esquema del modelo entidad relación resultante del diseño se observa en la figura 11.

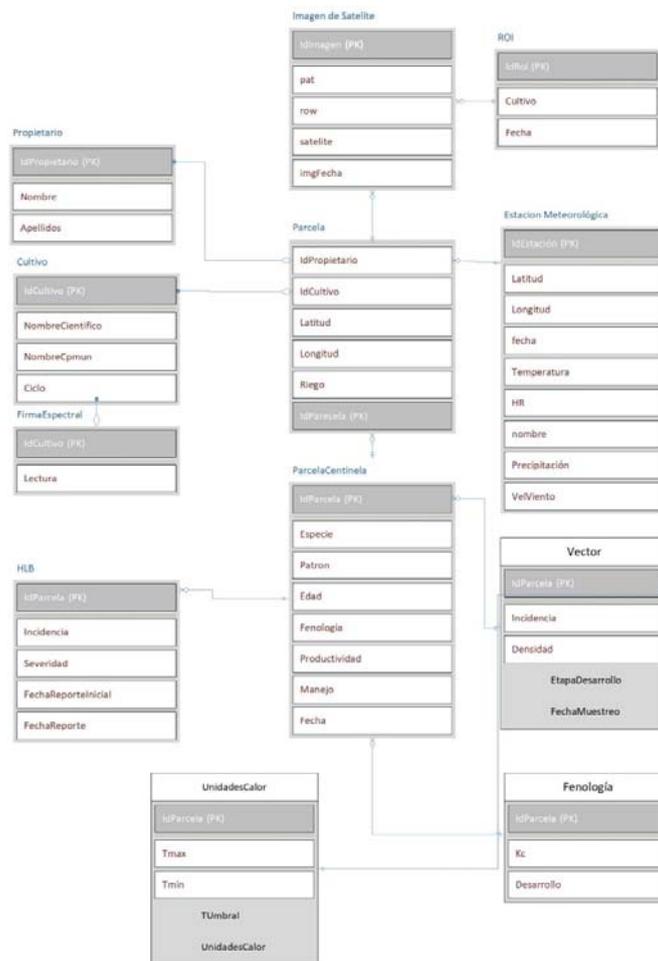


Figura 11. Modelo Entidad-Relación para el análisis del sistema epidemiológico asociado a huanglongbing

5.3 Diseño físico la base de datos

La capa física de la base de datos describe la organización de la base de datos y es llamado el esquema de la base de datos (Sumathi y Esakkirajan, 2007). Un esquema es la forma concreta que toma el modelo de datos conceptual desarrollado en la fase de diseño, en una representación física que puede ser implementada usando una computadora (Foster y Godbole, 2016).

Para la implementación física del esquema de datos se utilizó el motor de base de datos PostgreSQL 9.4 (Matthew y Stones, 2005; The PostgreSQL Global Development Group, 2017) que es un manejador de base de datos orientado a objetos –relacional , en él se implementaron los elementos alfanuméricos. Para el caso de los datos geográficos se utilizó la extensión postgis 2.0. (the PostGIS Project, 2017).

Los elementos cartográficos almacenados fueron principalmente mapas de tipo vector, relacionados con la distribución espacial de cultivos más importantes de la región que fueron derivados a partir de clasificaciones supervisadas de imágenes de satélite; la ubicación de huertos centinelas que utilizados para los procesos de monitoreo de las variables involucradas en el sistema de análisis; ubicación de estaciones meteorológicas existentes en la zona de estudio y los mapas con el análisis de riesgo resultantes, la información de tipo raster almacenada fueron las imágenes de satélite Landsat utilizadas para determinar la distribución de la superficie sembrada de los cultivos de la región.

Un elemento crítico en el proceso está relacionado con la calidad de los datos tomados en campo y la oportunidad con que estos pueden ser integrados para su procesamiento dentro la base de datos. Para resolver este problema se desarrolló una interface de captura para dispositivos móviles basados en el sistema Android (Figura 12).

Ventajas proporcionadas por la aplicación en tableta derivan de la guía explicativa de las escalas utilizadas para cada variable a muestrear, lo que apoya en uniformizar los criterios cuando se determinan los valores para los variables a medir en las huertas centinela.

Otra ventaja es la de integrar rápidamente de los datos a la base de datos a través del dispositivo electrónico, lo que se puede efectuar una vez que el dispositivo móvil puede

conectarse a internet a través de una red wifi, permitiendo además de consistencia y fiabilidad de los datos.

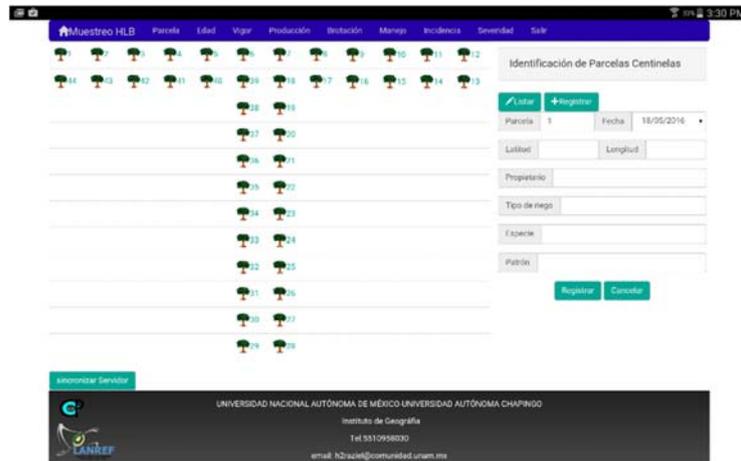


Figura 12. Interface para la toma de datos en campo para la base de datos espacial del sistema epidemiológico asociado a Huanglongbing

La consulta de datos se realiza a través del lenguaje SQL integrado en el SIG y en el motor de base de datos postgres, para el caso de los procesos estadísticos se utilizó el software estadístico R (The R Foundation, 2017). Los resultados que requirieron procesos de análisis espacial se realizaron integrados a través del Sistema de Información Geográfica (SIG) Quantum Gis (Qgis Foundation, 2017)

5.4. Resultados

Base de datos espacial: Se construyo e implemento la base de datos espacial para el análisis epidemiológico de Huanglongbing, utilizando el gestor de base de datos postgres 9.6 y el complemento espacial postGis 2.0. Contiene la siguiente información de 85 tablas relacionales, donde se almacenan datos espaciales y alfanúmericos de las variables del sistema epidemico asociado a Huanglongbing resultados de los procesos de analisis de

información de imágenes de satélite del período 2010 a 2014 de los municipios de Tecomán y Armería, además de la información de los muestreos en campo del mismo período.

Cuadro 2. Relación de tablas contenidas en la base de datos espacial para el análisis epidemiológico de HLB para Colima.

Tabla de datos	Descripción	2011	2012	2013	2014
Ahp_riesgo_m1	Mapa resultado del Analisis Jerarquico de Procesos (AJP)	x			
Ahp_riesgo_m2	Mapa resultado del Analisis Jerarquico de Procesos (AJP)		x		
Ahp_riesgo_m3	Mapa resultado del Analisis Jerarquico de Procesos (AJP)			x	
Ahp_riesgo_m4	Mapa resultado del Analisis Jerarquico de Procesos (AJP)				x
Arbol	Datos de las variables muestreadas en las 43 huertas centinelas	x	x	x	x
banano	Mapa de la distribución espacial del cultivo de platano	x	x	x	x
bufferlimonmex	Mapa de análisis de área de influencia para limón mexicano				x
cana	Mapa de la distribución espacial del cultivo de caña de azúcar	x	x	x	x
centroideslimonmexicano	Mapa de centroides de las huertas de limón mexicano				x
clipbufferparotas	Mapa de análisis de áreas de influencia para el primer foco en Tecomán				x

cocotero	Mapa de la distribución espacial del cultivo de cocotero	X	X	X	X
Cuerposdeagua2014	Cuerpos de agua de la zona de estudio				X
cultivo	Catálogo de cultivos de la zona de estudio	X	X	X	X
curvas_nivel50	Mapa de curvas de nivel a 50cm de la zona de estudio	X	X	X	X
Estaciondato	Datos climatológicos de las estaciones analizadas	X	X	X	X
estacionesmeteorologicas	Catálogo de estaciones meteorológicas	X	X	X	X
Huertosutmwgs84	Mapa de ubicación de huertos centinelas	X	X	X	X
landsat	Imágenes de satélite landsat 7 y 8	X	X	X	X
limonjoven	Mapa de la distribución espacial del cultivo de limon menor a 5 años				X
limonpersa	Mapa de la distribución espacial del cultivo de limon persa				X
Munitecarmwgs84	Mapa de municipios de Tecomán y Armería	X	X	X	X
papaya	Mapa de la distribución espacial del cultivo de limon persa				X
Parcela	Mapa de la ubicación espacial de las parcelas				X
pina	Mapa de la distribución espacial del cultivo de piña				X
Polurbanos2014	Mapa de polígonos urbanos				X

Suelodesnudo	Mapa de la distribución espacial del cultivo de suelos desnudo	x	x	x	x
unidadesclimaticas	Mapa de unidades climáticas	x	x	x	x

5.5. Conclusiones

La integración de las variables de un sistema epidemiológico en una base de datos proporciona importantes ventajas en los análisis necesarios para la toma de decisiones en torno a los riesgos de dispersión del Huanglongbing; mediante estas herramientas es posible la integración de procesos analíticos complejos a través de software estadístico o procesos de análisis espacial por medio de un SIG.

Es también una herramienta para mantener información histórica y actual que facilite análisis retrospectivos y prospectivos que apoyen a tomar decisiones en beneficio de los productores agrícolas.

El uso de software libre como herramientas de desarrollo en procesos complejos como el análisis del sistema epidemiológico del Huanglongbing, brinda la posibilidad de interoperabilidad entre una gama amplia de posibilidades de herramientas de análisis, lo que potencializa las posibilidades de desarrollos tecnológicos a costos razonables.

Bibliografía consultada

- Agrios, G. N. (2005). *Plant Pathology*. Academic Press.
- Aubert, B. (1987). Trioza erytrae Del Guercio and Diaphorina citri Kuwayama (Homoptera:psylloidea), the two vectors of Citrus Greening Disease:Biological aspects and possible control strategies, *42*, 149-162.
- Date, C. (2008). *The Relational Database Dictionary*. Berkeley, CA: Apress. Recuperado a partir de <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4302-1042-9>
- Esquivel Chávez, F. (2016). Dinámica de la concentración bacteriana de *Candidatus Liberibacter asiaticus* y su efecto en la expresión sintomática e histológica en cítricos agrios y dulces e implicaciones en el potencial de inóculo. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados, Montecillos. Estado de México. 165 p.
- Esquivel-Chávez, F., Valdovinos-Ponce, G., Mora-Aguilera, G., Gómez-Jaimes, R., Velázquez-Monreal, J. J., Manzanilla-Ramírez, M. Á., ... López-Arroyo, J. I. (2012). Análisis histológico foliar de cítricos agrios y naranja dulce con síntomas ocasionados por *Candidatus Liberibacter asiaticus*. *Agrociencia*, *46*(8), 769-782.
- Fitt, B. D. L., McCartney, H. A., y West, J. S. (2006). Dispersal of foliar plant pathogens: mechanisms, gradients and spatial patterns, 159-192. https://doi.org/10.1007/1-4020-4581-6_6
- Flores Sánchez, J. L. (2016). Epidemiología del HLB bajo tres escenarios regionales en México. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados, Montecillos. Estado de México. 289 p.
- Flores-Sanchez, J., Mora-Aguilera, G., Loeza-Kuk, E., López-Arroyo, J. I., Gutierrez Espinosa, M. A., Dominguez-Monge, S., ... Robles-García, P. (2017). Diffusion

model for describing the regional spread of Huanglongbing from first-reported outbreaks and basing an area wide disease management strategy. *Plant Disease*, 101.

<https://doi.org/10.1094/PDIS-04-16-0418-RE>

Flores-Virgen, R., Robles-González, M., Velázquez-Monreal, M., y Manzanilla-Ramirez, M.

(2010). Situación Actual del Huanglongbing (Huanglongbing) en Limón Mexicano Bajo las Condiciones Agroecológicas de Colima. Presentado en Primer Simposio Internacional sobre el Mejoramiento Genético de Cítricos. Recuperado a partir de <http://colimaproduce.net/SIMPOSIO/archivos/DIAPOSITIVA1.pdf>

Foster, E. C., y Godbole, S. (2016). *Database Systems*. Berkeley, CA: Apress. Recuperado a partir de <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4842-1191-5>

Hall, D. G., Wenninger, E. J., y Hentz, M. G. (2011). Temperature Studies with the Asian Citrus Psyllid, *Diaphorina citri*: Cold Hardiness and Temperature Thresholds for Oviposition. *Journal of Insect Science*, 11(83), 1-15. <https://doi.org/10.1673/031.011.8301>

Kirby, R. S., Delmelle, E., y Eberth, J. M. (2017). Advances in spatial epidemiology and geographic information systems. *Annals of Epidemiology*, 27(1), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.annepidem.2016.12.001>

Kranz, J. (2003). Comparative Epidemiology at the Systems Levels Host, Pathogen and Disease. En J. Kranz (Ed.), *Comparative Epidemiology of Plant Diseases* (pp. 49–92). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-05261-7_4

Matthew, N., y Stones, R. (2005). *Beginning Databases with PostgreSQL*. Apress. Recuperado a partir de <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4302-0018-5>

- Mora-Aguilera, G., Acevedo-Sánchez, G., Flores-Sanchez, J., González-Gómez, R., y Robles-García, P. (2013). Applied Epidemiology to Plant Disease Risk Analyses.
- Mora-Aguilera, G., Flores-Sánchez, J., Acevedo-Sánchez, G., Domínguez-Monge, S., Oropeza-Salin, C., Flores-Olivas, A., ... Robles-García, P. (2014). Vigilancia Epidemiológica y Estatus Actual del Amarillamiento Letal del Cocotero, Punta Morada de la Papa y Huanglongbing de los Cítricos (HLB) en México. *Revista mexicana de fitopatología*, 32(2), 120–131.
- Mora-Aguilera, G., Robles-García, G., López-Arroyo, J. I., Flores-Sánchez, J., Acevedo-Sánchez, G., & E González-Gómez, L.-K. (2016). Situación Actual y Perspectivas del Manejo del HLB de los Cítricos Current situation and Perspectives for Management of Citrus HLB. *Revista mexicana de fitopatología*, 32, 108–119.
- Nutter, F. F. W. (2007). The Role of Plant Disease Epidemiology in Developing Successful Integrated Disease Management Programs. En A. Ciancio y K. G. Mukerji (Eds.), *General Concepts in Integrated Pest and Disease Management* (pp. 45-79). Springer Netherlands. Recuperado a partir de http://link.springer.com.pbidi.unam.mx:8080/chapter/10.1007/978-1-4020-6061-8_3
- Python Software Foundation. (2017). Welcome to Python.org. Recuperado 5 de junio de 2017, a partir de <https://www.python.org/>
- Qgis Foundation. (2017). Bienvenido al proyecto QGIS! Recuperado 5 de junio de 2017, a partir de <https://www.qgis.org/es/site/index.html>
- Robles-González, M., Velázquez-Monreal, J., Manzanilla-Ramirez, M., Flores-Virgen, R., Arredondo-Bernal, H., y Archila-Marroquin, A. B. (2011). Bioecología del Psilido Asiático de los Cítricos *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Psyllidae) en Limón

- Mexicano en Colima (pp. 46-53). Presentado en 2do. Simposio Nacional sobre Huanglongbing 2011 - Diaphorina. Recuperado a partir de <https://sites.google.com/site/diaphorina/Huanglongbing2simpnal>
- Santivañez, T., Vernal, P., Mora-Aguilera, G., Díaz, G., y López-Arroyo, J. I. (2013). *Citrus: Marco Estratégico para la Gestión Regional del Huanglongbing en América Latina y el Caribe*.
- SENASICA. (2016, febrero 6). Situación fitosanitaria actual. Recuperado 2 de noviembre de 2015, a partir de <http://www.senasica.gob.mx/?id=4608>
- Sumathi, S., y Esakkirajan, S. (2007). *Fundamentals of Relational Database Management Systems* (Vol. 47). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Recuperado a partir de <http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-48399-1>
- the PostGIS Project. (2017). PostGIS 2.3.3dev Manual. Recuperado 5 de junio de 2017, a partir de <http://www.postgis.net/docs/manual-2.3/>
- The PostgreSQL Global Development Group. (2017). PostgreSQL: Documentation: 9.3: PostgreSQL 9.3.17 Documentation. Recuperado 5 de junio de 2017, a partir de <https://www.postgresql.org/docs/9.3/static/index.html>
- The R Foundation. (2017). R: The R Project for Statistical Computing. Recuperado 5 de junio de 2017, a partir de <https://www.r-project.org/>
- 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*, 96(1), 36–47. <https://doi.org/10.1653/024.096.0105>

Xu, C. F., Xia, Y. H., Li, K. B., y Ke, C. (1988). Further study on the transmission of citrus Huanglungbin by psyllid. Recuperado el 14 de noviembre de 2018, de <http://cipmtest.ent.ncsu.edu/Huanglongbingprojects/chineseresources/Regional%20Workshop%20on%20Citrus%20Greening%20Huanglongbing%20Disease%201987/Xu,%20C.%20F.%20-Further%20study%20on%20the%20transmission%20of%20citrus%20Huanglungbin%20by%20psyllid.pdf>

Yeung, A. K. W., y Hall, G. B. (Eds.). (2007a). *Spatial Database Systems* (Vol. 87). Dordrecht: Springer Netherlands. Recuperado a partir de <http://link.springer.com/10.1007/1-4020-5392-4>

Yeung, A. K. W., y Hall, G. B. (2007b). *Spatial database systems: Design, implementation and project management* (Vol. 87) (Vol. 87). Springer Science y Business Media. Recuperado a partir de <http://link.springer.com.pbidi.unam.mx:8080/book/10.1007/1-4020-5392-4>

VI. ANÁLISIS DE RIESGO REGIONAL DE DISPERSIÓN DEL HUANGLONGBING EN COLIMA A TRAVÉS DEL MÉTODO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO DE PROCESOS.

6.1. Introducción

El Huanglongbing (HLB) a partir de su primera detección en México en el año 2009 (SAGARPA, 2009), transforma la actividad citrícola que desarrolla acciones con el objetivo de minimizar los impactos del HLB y mantener los niveles de productividad.

Experiencias en México indican que la principal estrategia para reducir la tasa de infección, consiste en prevenir la dispersión del vector, por lo que el esfuerzo se ha enfocado al establecimiento de grandes áreas de control regional del psilido asiático de los cítricos (PAC) nombre común que se le ha dado a *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Liviidae), insecto que de manera natural actúa como vector de la bacteria que ocasiona el Huanglongbing; a estas áreas en México se les ha denominado “Áreas Regionales de Control (ARCOS)” del psilido asiático; los ARCOS se delimitaron y operan actualmente en las principales las regiones citrícolas de México (SENASICA, 2018; Flores-Sánchez *et al*, 2017, 2016)

Esta tarea, requieren del análisis de escenarios multifactoriales complejos en donde se desarrolla el sistema epidemiológico, donde interactúan elementos del medio físico; los aspectos biológicos relacionados con el cultivo de limón mexicano (*Citrus aurantifolia*) y con *D. citri* vector natural de la bacteria *Candidatus Liberibacter spp* agente causal del Huanglongbing y los factores vinculados con las prácticas agronómicas desarrolladas por los productores (Flores-Sánchez *et al*, 2017, 2016; Mora-Aguilera *et al.*, 2013, 2014, 2016).

El análisis jerárquico de procesos es un enfoque basado en criterios múltiples para la toma de decisiones; para el análisis los factores involucrados, se ubican en estructuras de jerarquías

descendientes que inician en un objetivo general, a criterios, subcriterios y alternativas en una sucesión de niveles. La organización de las metas, factores y atributos de interés en una jerarquía sirven para dos propósitos, en primer lugar para tener una visión global de las relaciones complejas inherentes al problema a resolver y por otra parte apoya a los tomadores de decisiones a saber si los factores involucrados en cada nivel son del mismo orden de importancia y son comparables entre sí (Saaty, 1990).

El análisis jerárquico de procesos es una metodología analítica que ha demostrado su utilidad en muchos campos de importancia para el hombre, tales como la determinación de factores éticos para procesos de agricultura sustentable (Veisi, Liaghati, y Alipour, 2016), en la implementación de evaluación de riesgos en la implantación de procesos de planeación estratégica (Huang, Zhu, y Han, 2013), en la industria para lograr la mejor localización de plantas de energía (Yagmur, 2016), en la solución de problemas regionales como el establecimiento de los mejores sitios generadores de energía eólica (Höfer, Sunak, Siddique, y Madlener, 2016), entre muchos otros. Una experiencia en el análisis de riesgos es la desarrollada en el Perú para el caso de análisis de susceptibilidad y riesgo de la población a bajas temperaturas (Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED), 2015).

Para el análisis del sistema epidemiológico asociado a Huanglongbing, la jerarquía de procesos está derivada del análisis del sistema epidemiológico, que establece y valora la importancia de los factores del ambiente, patógeno, hospedante y la acción del hombre y las relaciones funcionales establecidas entre ellos (Mora-Aguilera *et al.*, 2014; Cooke, Jones, y Kaye, 2006).

Se distinguieron como elementos del medio ambiente la temperatura, la humedad relativa, la precipitación y la altitud como las variables de mayor influencia en el sistema epidemiológico. Para el caso del patógeno se definen las variables de incidencia, severidad de la enfermedad. Para el hospedante se determinó la edad de la huerta, el índice de continuidad y de abundancia cítrica. Finalmente se considera la transformación que el hombre realiza de estos factores con sus prácticas agrícolas fundamentalmente en lo referente a actividades culturales como la poda, la fertilización y manejo fitosanitario.

Con estos elementos se construyeron matrices de los escenarios para el desarrollo epidemiológico del fenómeno, estableciéndose los niveles de riesgos de las 43 huertas centinelas incluidas en el estudio. Para obtener mapas se aplicaron técnicas de interpolación para obtener expresión espacial del riesgo para la región de estudio.

Los resultados reportados indican que la metodología propuesta tiene un adecuado nivel predictivo del proceso, coincidiendo con los resultados obtenidos por Flores-Sanchez *et al.* (2016, 2017) en la misma zona de estudio, por lo que es posible afirmar que esta propuesta puede constituirse en una posibilidad para el análisis de sistemas epidemiológicos fundamentalmente en escenarios pre-endémicos, donde no se posee información estadística para desarrollar metodologías clásicas; situación que ocurre de manera frecuente en el ámbito de la inteligencia fitosanitaria, fundamentalmente con plagas cuarentenarias o plagas bajo vigilancia epidemiológica.

6.2. Materiales y métodos

El área de estudio está comprendida en los límites geográficos de los municipios de Tecomán y Armería Colima, cuyas coordenadas extremas de acuerdo con el INEGI (2014) son: Al

norte 19°31', al sur 18°41' de latitud norte; al este 103°29' y al oeste 104°41' de longitud oeste.

6.2.1 Toma de datos y muestreo

La toma y análisis de información se fundamentó en las componentes del sistema epidemiológico, que concentra su atención en las relaciones funcionales que establecen los elementos físicos del clima, patógeno, hospedante y la acción del hombre, tomando como eje integrador al cultivo, que se constituye en el centro del sistema epidemiológico (Flores-Sanchez *et al.*, 2016; Mora-Aguilera *et al.*, 2014).

Para el análisis se considero a la temperatura, humedad relativa, precipitación como los principales factores del clima debido a que los estudios de la biología de *D. citri* indican a estos factores como los más importantes en su establecimiento y desarrollo. Por otra parte, son elementos que también influyen de manera sustancial en el desarrollo fenológico del limón mexicano, determinando de manera específica los momentos naturales de brotación, floración y cosecha (Torres-Pacheco *et al.*, 2013).

El componente del patógeno, *Candidatus liberibacter* y su vector *D. citri*; determinaron las variables epidemiológicas de incidencia y la severidad de la enfermedad. El componente hospedante del patógeno, son las huertas citricolas de limón mexicano y limón persa establecidas en el área de estudio, para ellas se determinó el índice de abundancia y continuidad citrícola de acuerdo a los radios epidemiológicos establecidos en el protocolo de emergencia para el manejo de Huanglongbing dado por el SENASICA (Flores-Sanchez *et al.*, 2016; SAGARPA, 2009). Por último, se considera el factor humano que modifica con su

influencia la expresión de los factores anteriores con el manejo agronómico que realiza a las huertas.

Los elementos del espacio físico considerados en el proceso de AJP para determinar el riesgo de dispersión de Huanglongbing consistieron en datos meteorológicos de las estaciones climáticas del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Las estaciones del INIFAP tienen la ventaja de estar ubicadas en los espacios agrícolas más importantes del estado, aunque su registro data generalmente del año 2010 hasta la fecha. Las variables físicas del clima se completaron con 9 estaciones a cargo de CONAGUA.

Los datos de abundancia de limón mexicano y limón persa, así como su distribución espacial para el período de 2010 a 2014 se determinaron con ayuda de técnicas de percepción remota, al realizarse clasificaciones supervisadas utilizando 15 imágenes Landsat 7 y 8 del período.

Las variables agronómicas correspondientes al hospedante del patógeno y su vector se determinaron a través de 8 muestreos directos de 43 huertas centinelas distribuidas en los municipios de Tecomán y Armería para los años de 2011 a 2014, donde se midieron variables tales como la edad de los árboles, cantidad de brotes vegetativos, tipo de riego, número de plagas presentes en el cultivo, rendimiento y vigor.

Debido a que el análisis epidemiológico considera como elemento integrador al hospedante, se midieron en las huertas variables epidemiológicas de incidencia, que plantea la presencia o ausencia de *Candidatus liberibacter*. Una segunda variable epidemiológica medida fue la severidad que permite monitorear el grado de desarrollo que ha alcanzado la enfermedad en

el árbol y en la huerta, es decir, define la cantidad de inoculo disponible (Flores-Sanchez *et al.*, 2016; Mora-Aguilera *et al.*, 2014).

Las huertas elegidas se ubicaron estratégicamente cercanas a elementos que originaban discontinuidad en las huertas de limón tales como caminos, orilla del mar, orilla de lagos preferentemente, debido a que en Colima también se verifico la existencia del efecto de orilla reportado en Brasil y USA (Flores-Sanchez *et al.*, 2016; Bassanezi, 2010).

En cada sitio se muestrearon 44 árboles ubicados en “T” tomando los 24 árboles de las dos primeras hileras de la huerta que coincidieran con el camino principal de la huerta y 20 árboles más que se adentraran hacia la parte central de la misma. El propósito de las hileras cercanas a los caminos era principalmente determinar la incidencia de Huanglongbing y el de los árboles hacia el centro de la huerta determinar el nivel de establecimiento de la enfermedad en la huerta, para tener valores únicos para cada una de las huertas incluidas en el muestreo se calcularon las medias aritméticas de cada una de las variables (Flores-Sanchez *et al.*, 2016).

6.2.2 Análisis Jerárquico de Procesos

Se analizó cada una de las variables de manera individual y posteriormente se integraron en conjunto a la metodología de análisis jerárquico de procesos, donde se definieron las matrices de ponderaciones a través de la escala jerárquica propuesta por Saaty (1990), estas matrices determinaron los escenarios probables para el análisis multicriterio del fenómeno.

Para determinar los límites de las escalas de riesgo, se hicieron combinaciones de factores identificando aquellas que se consideraron las de desarrollo óptimo, hasta llegar a las combinaciones más desfavorables de factores para el desarrollo y dispersión del

Huanglongbing. A partir de estos valores extremos se definieron escenarios probables, de acuerdo a los niveles planteados por el análisis jerárquico, categorizándolos en función de la experiencia observada.

El análisis jerárquico de procesos se desarrolló con el apoyo del software estadístico R y con el complemento ahp (Analytic Hierarchy Process) (Glur, 2018), mediante el cual se analizaron las variables para la toma de decisiones complejas y se determinó la decisión derivada para cada una de las 43 huertas involucradas en el estudio, finalmente con el objetivo de presentar mapas de riesgo para toda la zona de estudio se utilizaron los procedimientos de interpolación por medio de un sistema de información geográfico.

6.3. Resultados y discusión

En el manejo del Huanglongbing en la región de limonera del estado de Colima plantea el objetivo prioritario de minimizar el impacto del Huanglongbing y mantener la productividad del sistema producto limón mexicano, lo que implica que las actividades agronómicas estarán encaminadas a:

1. Productores que poseen plantaciones donde el Huanglongbing ha sido detectado y que estas plantaciones están en etapa productiva, para desarrollar prácticas agronómicas que logren minimizar el impacto del HLB y con ello mantener las huertas productivas.
2. Los productores que poseen huertas libres de la presencia de Huanglongbing, para evitar la llegada de la enfermedad a través de las practicas agronómicas adecuadas
3. Los productores que poseen huertas jóvenes con la presencia de Huanglongbing y que aún no están en etapas productivas, y que económicamente no son viables, por lo

que es necesario apoyarlos para una reconversión productiva o bien la replantación de huertas de limón mexicano libres de la enfermedad

6.3.1 Criterios epidemiológicos:

Incidencia: Para el primer muestreo desarrollado en marzo de 2012, el 18% de las 42 huertas elegidas presentaron un porcentaje de incidencia 0, 15% resultaron con incidencias por debajo del 15% que se considera de riesgo bajo; 41% de huertas presentaron incidencias entre 16% y 30%, es decir, riesgo medio y un 11% tuvieron incidencias entre el 30% y 50% consideradas como riesgo alto. Un 48% de las huertas se clasificaron en riesgo muy alto con incidencias por arriba del 50%

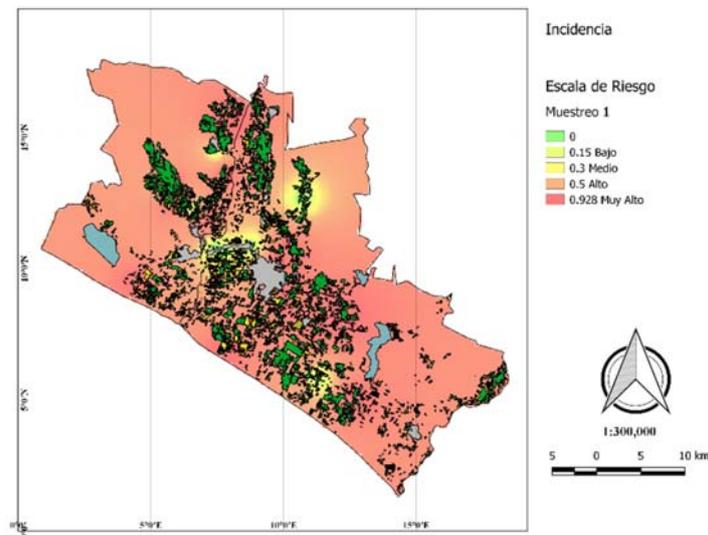


Figura 13. Mapa de riesgo respecto a la incidencia del muestreo 1 en 2012

La figura 13 deja ver que la presencia del Huanglongbing (incidencia) para marzo de 2012 se daba en un patrón aleatorio, considerado un factor potencial de dispersión de alto riesgo para la región, debido a que las distancias entre las fuentes de inóculo y las huertas libres era

reducida, condicionando la dispersión del CLas fundamentalmente a los factores de manejo agronómico.

Para el segundo muestreo en agosto de 2012 sólo 5 meses después (Figura 14), las proporciones se habían incrementado de manera sustancial, la huerta con incidencia cero se mantiene en este rango, también se mantienen en un rango similar a 2012 las huertas de rango bajo con 15%. Un decremento sustancial se da en las huertas clasificadas de rango de riesgo medio que desaparecen y pasan en su mayoría en un rango de riesgo muy alto con un porcentaje del 71%, tres huertas alcanzan el 100% de incidencia.

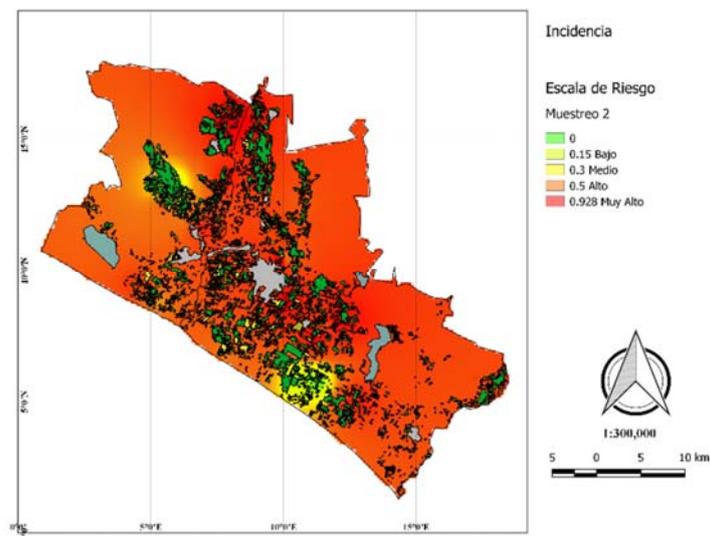


Figura 14. Mapa de riesgo respecto a la incidencia del muestreo 2 en 2012

El tercer muestreo en marzo de 2013 (Figura 15) observó que el 90% de las huertas presentaba valores de incidencia del 90%, clasificadas como de muy alto riesgo, lo anterior corrobora el crecimiento acelerado de las proporciones de huertas infectadas en la región de estudio reportado también por Flores-Sanchez (2016).

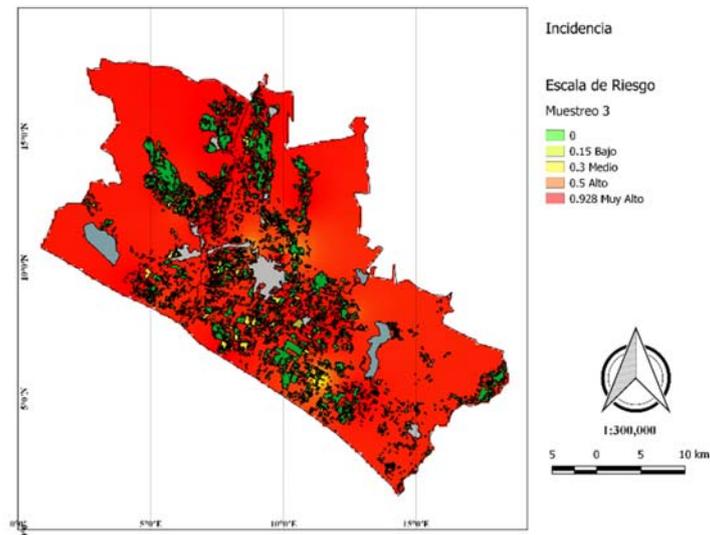


Figura 15. Mapa de riesgo respecto a la incidencia del muestreo 3 en 2013

El cuarto y último muestreo de marzo de 2014 (Figura 16), muestra que el 25% de las huertas tiene rango de riesgo bajo y 75% riesgo muy alto, esto significa una disminución en relación al muestreo de 2013, lo puede atribuirse a las estrategias de manejo implementadas, a la dinámica de sustitución de cultivos o al restablecimiento de nuevas huertas de limón mexicano libres, esta situación es coincidente con lo establecido en el capítulo 3 donde se aprecia el mismo fenómeno.

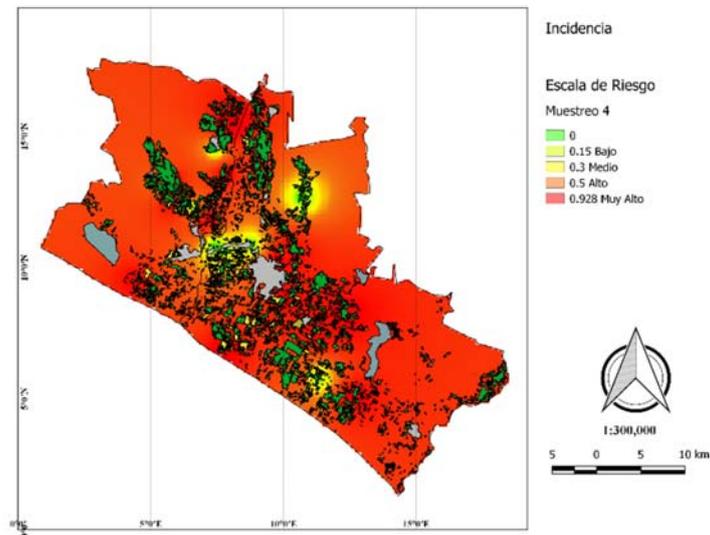


Figura 16. Mapa de riesgo respecto a la incidencia del muestreo 4 en 2014

Severidad: Para el caso de la severidad se observa un avance mayor lentitud comparado con la incidencia, lo anterior debido principalmente a las prácticas agronómicas encaminadas fundamentalmente a minimizar los impactos de HLB y limitar el avance de dispersión del CLAs. Debido a ello esta variable se constituye en uno de los indicadores de mayor peso para determinar las alternativas que el productor ha de tomar para reducir el impacto de la enfermedad.

Para el muestreo 1 (Figura 6.6) se observa que la mayoría de la región se ubica con niveles bajos de riesgo, sólo resalta la región costera en el municipio de Armería en donde se localizaron huertas con índices superiores al 50% de severidad por lo que se clasifican de riesgo alto.

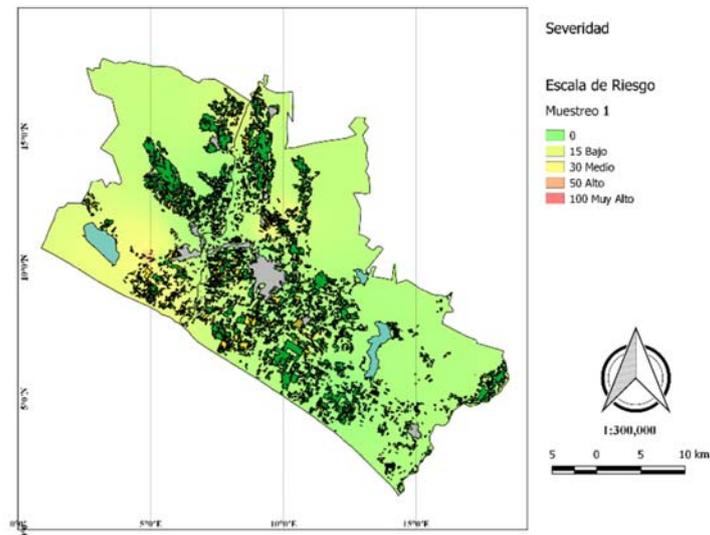


Figura 17. Mapa de riesgo respecto a la severidad del muestreo 1 en 2012

Para agosto de 2012 (Figura 17), las condiciones de la severidad sufrieron un incremento importante, moviéndose en un par de meses, un alto porcentaje de las huertas de un nivel bajo a un nivel medio de riesgo. Otro aspecto relevante lo significa que las zonas de alto riesgo se diversificaron apareciendo en los lomeríos del municipio de Armería y en los alrededores de la ciudad de Tecomán al igual que en la zona Costera del mismo municipio, cercanas al sitio donde se detectó el primer brote histórico para la región.

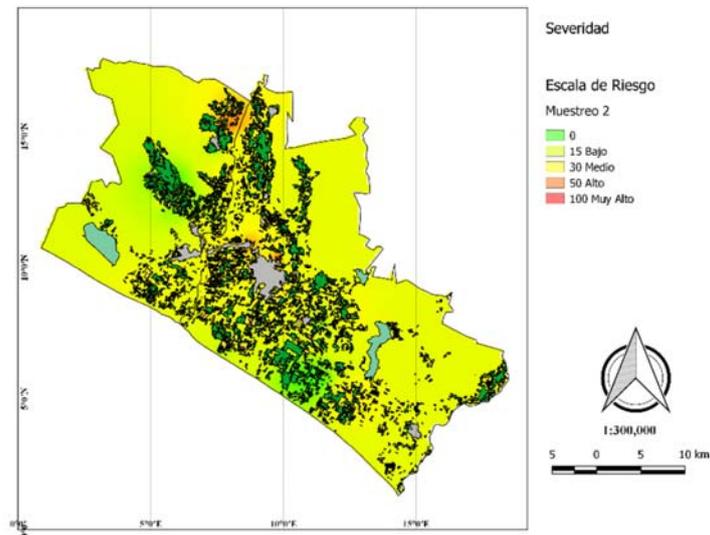


Figura 18. Mapa de riesgo respecto a la severidad del muestreo 2, en 2012

Las comparaciones entre los años 2012 y 2013 (Figura 17 y 18) indican un estatus de la severidad muy similar, solamente apreciable un incremento de los valores en las zonas indicadas por el primer muestreo (costa del municipio de Armería) donde los porcentajes de severidad se incrementaron hasta alcanzar niveles de riesgo medio.

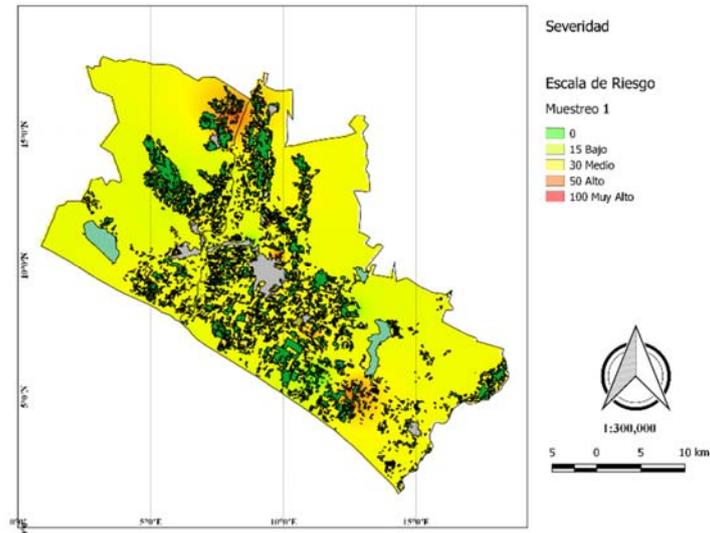


Figura 19. Mapa de riesgo respecto a la severidad del muestreo 3, en 2013

Para el año de 2013 (Figura 19) la severidad mantiene un progreso de crecimiento gradual, al reducirse drásticamente las áreas con severidades de nivel bajo e incrementarse las zonas de riesgo medio y alto. Estas áreas se distribuyen a lo largo de toda la zona citrícola en pequeños manchones, desde las zonas costeras hasta los lomeríos de ambos municipios.

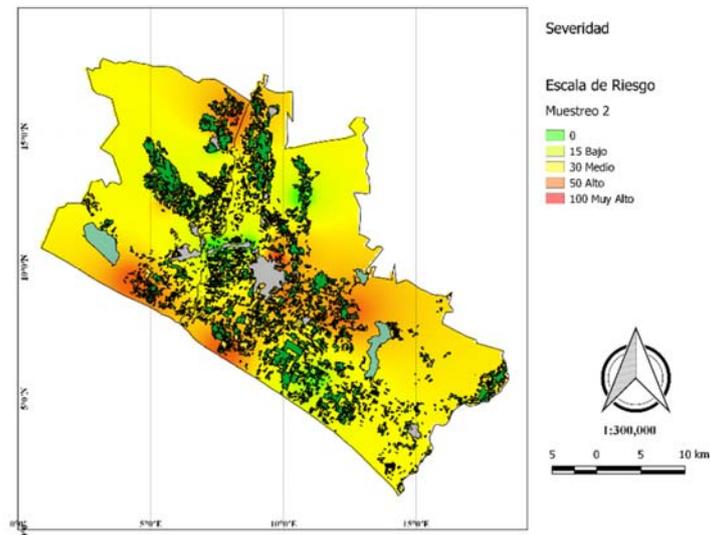


Figura 20. Mapa de riesgo respecto a la severidad del muestreo 4, en 2014

En 2014 (Figura 20) la severidad del Huanglongbing se acentúa en la totalidad de las huertas, incrementándose y ampliándose las zonas de alto y muy alto riesgo y alcanzando una distribución amplia en toda la zona de estudio, este comportamiento fue reportado por Esquivel-Chavez (2016, 2012) a nivel de planta y por Flores-Sánchez (2016, 2017) a nivel de huerta y región.

6.3.2. Criterios agronómicos:

Edad de la huerta: Clasificada en huertas jóvenes, menores de 5 años y que aún no alcanzan su etapa productiva, por lo que su crecimiento vegetativo es acelerado y ofrecen una mayor susceptibilidad. En contra parte, huertas productivas que mayores de 5 años que inician o están en plena etapa productiva, por lo que su crecimiento vegetativo (brotación) está sujeto a factores de manejo o bien factores fisiológicos propios de las plantas adultas en estas

especies de rutáceas, por lo que la susceptibilidad ante el Huanglongbing es menor en relación a una planta joven.

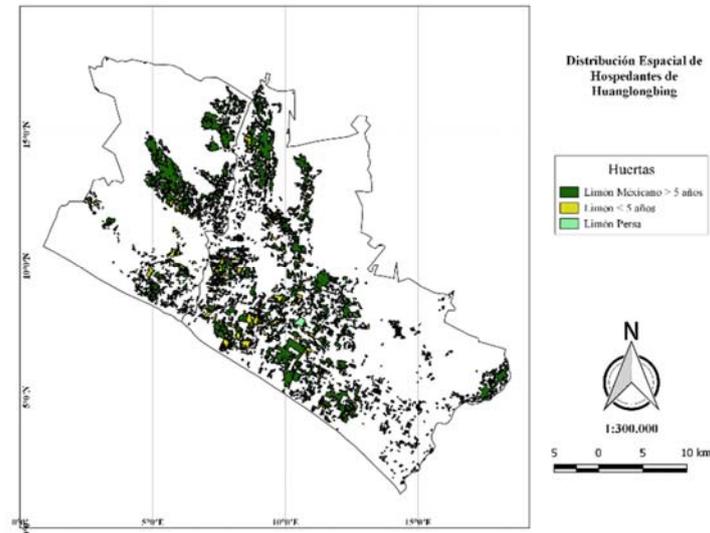


Figura 21. Distribución de huertas de limón de acuerdo a su Edad

La figura 21 muestra la distribución de las huertas de limón de acuerdo a la edad, observándose que existe un importante número de huertas alrededor de 5000 ha de reciente establecimiento, que se distribuyen en su mayor número en la región costera de Tecomán y Armería. Es posible distinguirlas distribuidas de forma aleatoria por toda la región, lo que de acuerdo a la susceptibilidad indicada incrementa el riesgo de debido a la mayor susceptibilidad (Esquivel-Chavez *et al.*, 2016).

Manejo de la huerta: Medida a partir de la diversidad y frecuencia de las prácticas agronómicas desarrolladas, está fuertemente correlacionada con el manejo dado a las plagas, que se deduce de manera indirecta a partir del complejo de plagas encontrado en los huertos muestreados; el supuesto planteado es que un mejor manejo agronómico reduce el número

de plagas. Se complementa esta información con observaciones relacionadas a la presencia de riego y a su nivel de tecnificación.

6.3.3. Criterios espaciales

Índice de Continuidad citrícola:

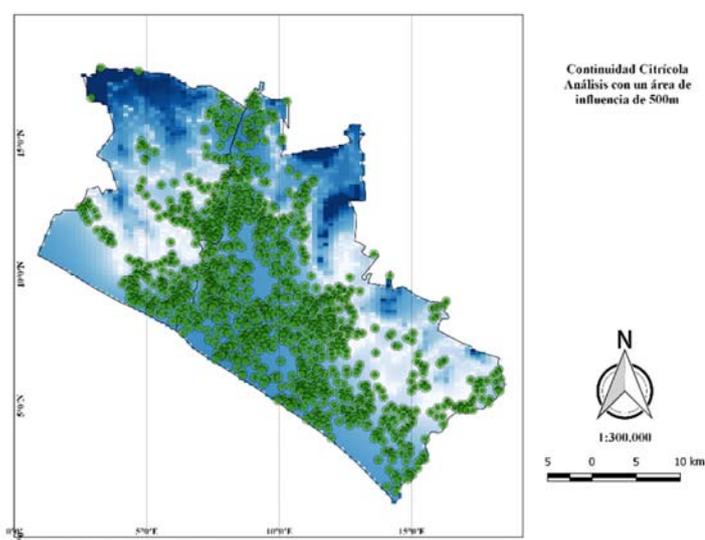


Figura 22. Continuidad citrícola considerando un movimiento de 500 m del vector.

La figura 22 muestra que para *D. citri* prácticamente los huertos de cítricos son continuos a partir de los centroides de las huertas de limón mexicano, este resultado índico la existencia de un alto riesgo de dispersión por parte del vector, debido a que no existe restricción de movimiento, por lo que el índice de continuidad para la región se considera como el más alto posible.

Índice de abundancia citrícola: La figura 23 muestra las áreas de influencia definidas a partir del primer foco de la enfermedad. El protocolo de emergencias indica la necesidad de trazar radios de influencia cada 8 km para determinar la posible dispersión del patógeno y

Al observarse el radio de 16 km el índice de abundancia cítrica crece de manera importante, hasta alcanzar un valor superior al 25%, las huertas son de mayor tamaño y se encuentran más concentradas manteniendo un índice de continuidad alto. La lejanía en relación al foco puede implicar un riesgo menor, no así por continuidad y disponibilidad de hospedante. Para el radio de 24 km el índice de abundancia sufre nuevamente un incremento hasta llegar por arriba del 30%, que implica un factor de riesgo mayor a pesar de encontrarse con una distancia mayor al foco. Para el cuarto y quinto radio el índice de abundancia cítrica es el más alto con valores superiores al 40%.

6.3.5. Análisis de susceptibilidad

Clima: La región delimitada por los municipios de Tecomán y Armería presenta dos unidades climáticas de importancia, el de mayor importancia en el área agrícola de Tecomán y la provincia costera es el cálido subhúmedo del tipo BS1(h')w(w) según la clasificación mundial de tipos de clima de Wladimir Kópepen (1936), modificada por Enriqueta García (INEGI, 2017), en cambio para el área agrícola de Armería fundamentalmente se localiza el tipo Aw0(w), que es catalogado como semiseco muy cálido. En términos agronómicos esto podría representar la idea de dos grandes regiones con la principal diferencia de la cantidad de humedad asociada, lo que puede significarse un factor relevante, debido a la susceptibilidad de *D. citri* a condiciones de alta humedad.

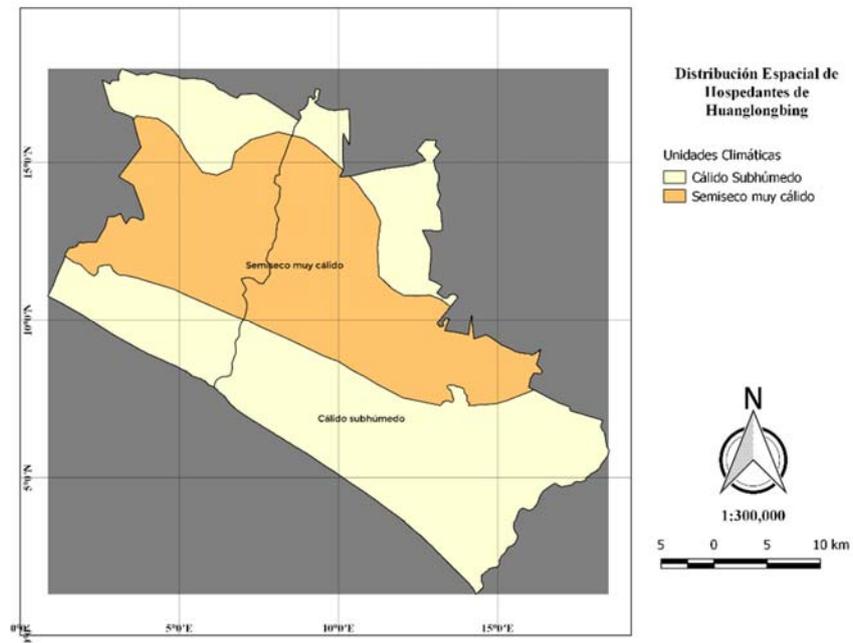


Figura 24. Unidades climáticas de los municipios de Tecomán y Armería. (INEGI, 2017)

Temperatura

Comportamiento climático de la temperatura media. La temperatura media registrada en las estaciones del INIFAP se calculó a través del promedio entre la temperatura mínima y la temperatura máxima diaria para el período de los años de 2010 a 2014 su comportamiento se observa en la figura 24.

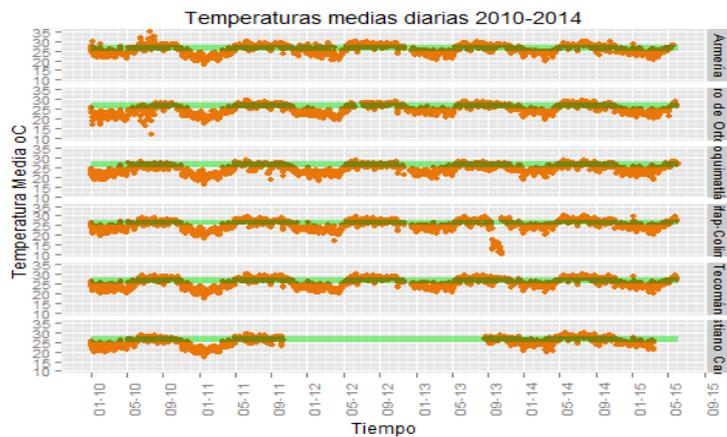


Figura 25. Comportamiento de la Temperatura Media en la zona de estudio

La temperatura media diaria en las estaciones meteorológicas de la región reporta coincidencias en el 62.4% de los días registrados para el período de 2010 a 2014, respecto, con el rango óptimo de desarrollo de *D. citri* que se ubica entre los 25-28°C (Hall, 2011). Es claro que la forma de cálculo de las temperaturas medias diarias, basadas en el promedio de las temperaturas extremas diarias, hace suponer que durante importantes lapsos del día en la región se presentan los rangos de temperaturas óptimas para el desarrollo de ciclo de vida de *D. citri*, por lo que puede considerarse a la región de estudio como altamente propicia para el establecimiento y desarrollo de poblaciones de *D. citri*, (Robles-González *et al.*, 2011) reportan hasta 22 generaciones de *D. citri* para la región a lo largo de todo el año, este análisis coincide con lo reportado por Torres-Pacheco *et al.*, (2013).

Por otra parte la temperatura también presenta una gran influencia en el desarrollo fisiológico de las plantas de limón mexicano, es de especial importancia para el caso, la etapa de emisión de brotes vegetativos, (Robles-González *et al.*, 2011) indicó que de manera natural en la región de estudio se presentan dos períodos de brotación natural, la primera ubicada en los

meses de octubre a noviembre y la otra durante los meses de marzo y abril, sin embargo, debido a que los agricultores buscan tener producción de limón a lo largo de todo el año se inducen brotaciones vegetativas con base en prácticas de fertilización y poda, situación que es factible gracias a lo constante de las temperaturas en rangos entre los 15 a 32 grados centígrados.

La situación cobra gran relevancia debido a que alta presencia de poblaciones de *D. citri* están asociadas a la presencia de brotes tiernos en los árboles de los cítricos, por sus hábitos alimenticios (Bové y Duran-Vila, 2015)

Humedad relativa

La humedad relativa es otro de los factores de importancia en el análisis del sistema epidemiológico, debido a la influencia que tiene las humedades relativas superiores al 87% que inducen mortalidad de *D. citri* en un rango del 60% al 70% (Hall, 2011)

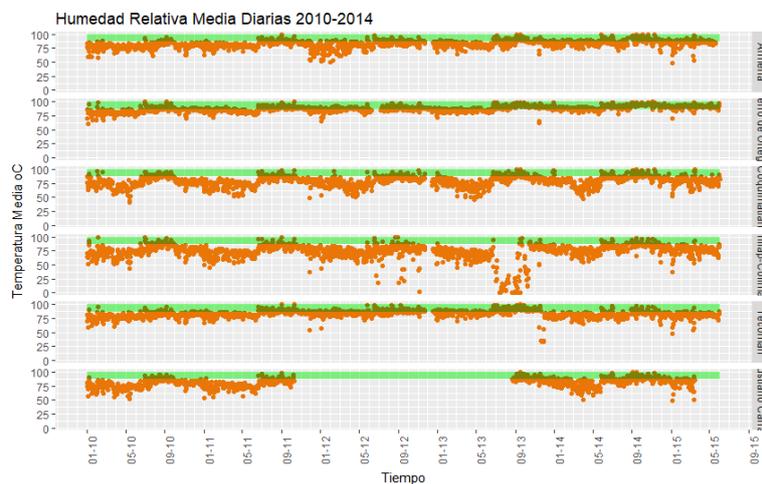


Figura 26. Comportamiento de la Humedad Relativa

Se observa en la figura 26 que durante que la región se caracteriza por presentar humedades relativas alrededor del 75% durante una gran parte del año, característica que puede considerarse favorable en terminos de las susceptibilidades establecidas a valores altos de humedad relativa, lo que por otra parte indice mortalidad de brotes debido a la presencia de enfermedades fungosas tal como lo reporta Robles-Gonzalez *et al.*,(2011).

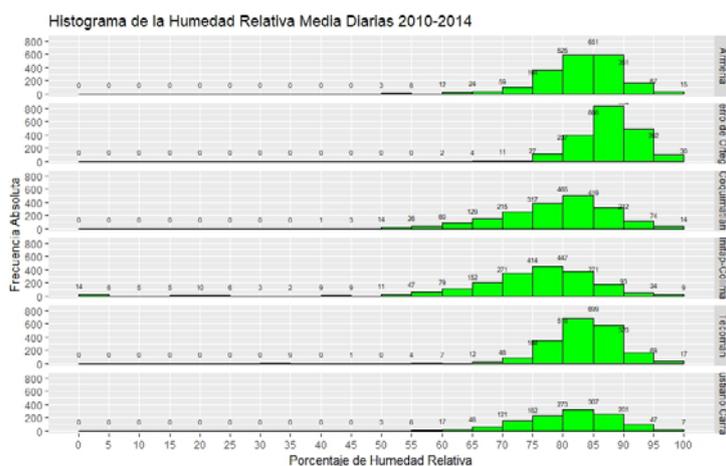


Figura 27. Distribución de la Humedad Relativa en la zona de estudio

En la región el 20% de los días del año rebasa la humedad del 90%, lo cual es un factor natural a considerar para el manejo, sobre todo durante la época de lluvias (Figura 27).

Precipitación

Las isoyetas delimitadas para le región indican que la precipitación anual esperada en la región de manera coincidente con el tipo climático, presentándose para el tipo cálido subhúmedo del tipo BS1(h')w(w) valores de precipitación promedio entre los 800 y 1000 mm anuales, en cambio para el tipo Aw0(w) se tienen valores que van de los 700 a los 800 mm. Debido a la coincidencia marcada por los tipos climáticos y a la estacionalidad de las lluvias

que coinciden con épocas de humedad Relativa superiores al 85%, esta variable se analizara como un solo conjunto con la humedad relativa.

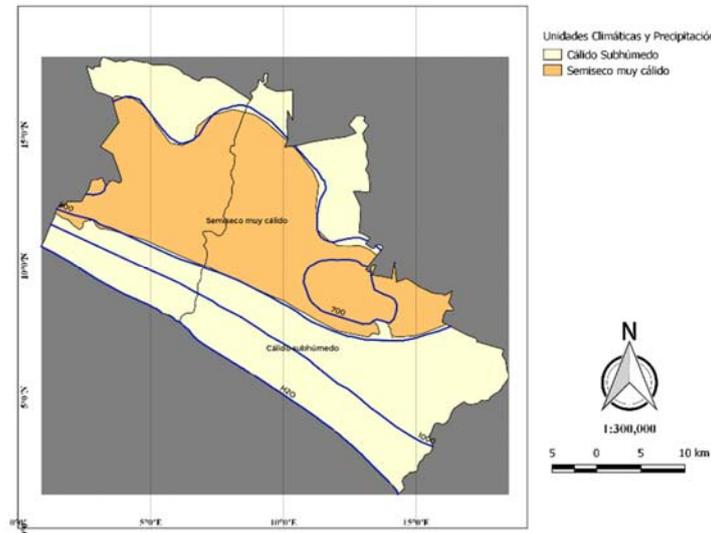


Figura 28. Distribución de las Isoyetas para el área de estudio. (INEGI, 2017)

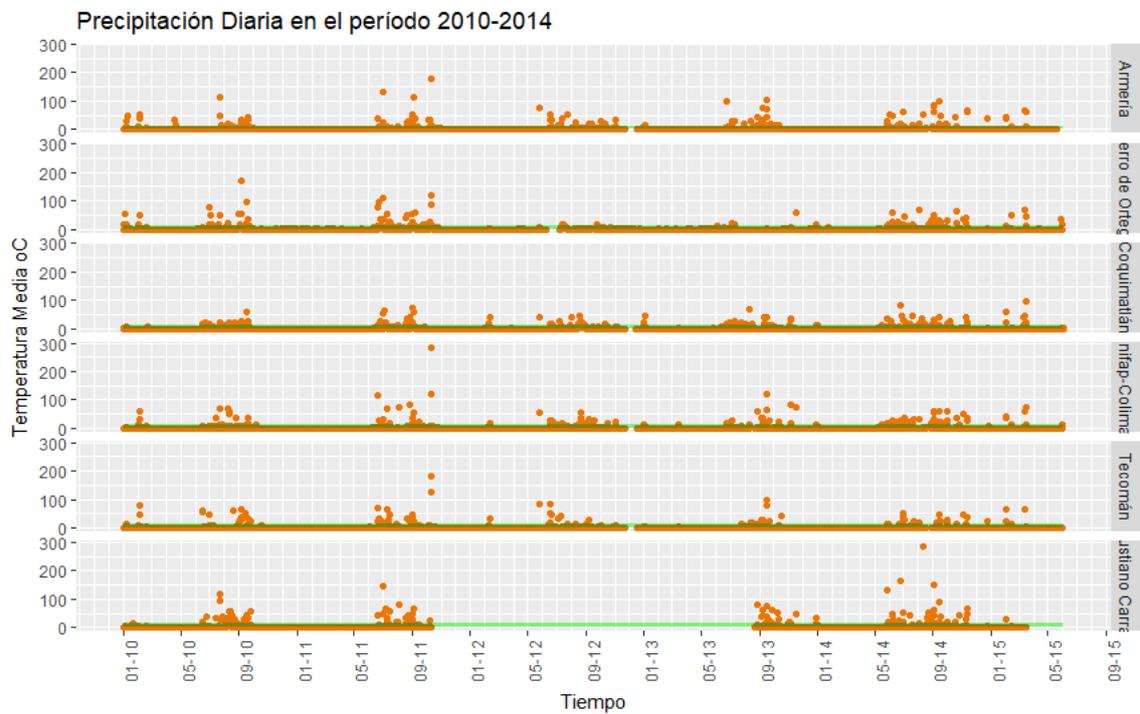


Figura 29. Comportamiento de la precipitación diaria en la zona de estudio

6.3.6 Factores condicionantes

Altitud: La biología de *D. citri* indica que sus poblaciones no se encuentran a altitudes superiores a los 1500 msnm (Hall, 2011), lo que para el caso del área de estudio no es aplicable debido a que la altura máxima no rebasa el límite de los 400 msnm.

Disponibilidad de hospedante: *Candidatus liberibacter* agente causal del Huanglongbing es una bacteria limitada a plantas de la familia de las rutáceas, lo mismo que su vector *D. citri*, lo cual condiciona su biología a la presencia de plantas de esta familia, determinado por el índice de abundancia y el índice de continuidad citrícola.

Manejo fitosanitario: Un manejo fitosanitario adecuado de las huertas por parte de sus propietarios reduce de manera importante la presencia *D. citri* lo que reduce la densidad poblacional del vector y por tanto el riesgo de dispersión del Huanglongbing

Factores desencadenantes

Temperaturas: *D. citri* prospera de manera óptima en un rango de temperaturas entre los 25 a 28 oC temperaturas presentes en la región por lo que pueden presentarse hasta 22 generaciones del insecto (Robles-González *et al.*, 2011).

Brotación vegetativa: La etapa de brotación vegetativa en las huertas de limón mexicano inducen aumentos en la presencia del vector debido a la disponibilidad de alimento.

Edad: Huertos jóvenes menores a los 5 años inducen de manera continua la brotación vegetativa, implicando una mayor susceptibilidad por los hábitos alimenticios del vector, plantaciones mayores, reducen la brotación vegetativa natural.

Prácticas agronómicas: Las prácticas agronómicas de fertilización y podas inducen respuestas fisiológicas en las plantas que dan como resultado la generación de brotación vegetativa fuera de los períodos naturales, incrementando la disponibilidad de alimento e incrementando el riesgo de poblaciones altas de *Diahorina citri*.

Con fundamento en los factores detonantes y limitantes, así como en los resultados obtenidos de las variables consideradas en la jerarquía del proceso se propone la siguiente Categorización de niveles de susceptibilidad (cuadro 2).

Cuadro 2. Categorías de riesgo establecidas para el sistema epidemiológico asociado a huaglongbing

	Riesgo Bajo, se presenta cuando en el ambiente se presentan condiciones desfavorables para el desarrollo de <i>D. citri</i> , es decir, temperaturas extremas por debajo de los 15 oC. Humedades relativas altas o precipitaciones intensas por arriba de los 150 mm, el índice de abundancia citrícola esta por debajo de 0.3, existe un buen manejo agronómico especialmente fitosanitario y que las huertas no hayan sido fertilizadas ni podadas recientemente	Bajo
	Moderado: Se presenta en presencia de altas temperaturas sin alcanzar el óptimo para desarrollo de <i>D. citri</i> , en huertas superiores a 5 a 10 años y en presencia de humedades entre el 60% y 80%; lluvias moderadas entre los entre 120 a 150 mm, el manejo de plagas es	Moderado

	adecuado sin ser excelente, tampoco se ha realizado practicas de poda y fertilización	
	Alto: Se presenta en presencia de temperaturas entre los 20 a 22 oC o bien entre los 29 a 32 oC en huertas entre alrededor de los 5 años de edad y en presencia de HR entre el 50 al 60% y lluvias moderadas alrededor de los 100mm, un deficiente manejo agronómico de plagas o bien la realización constante de podas y fertilizaciones para inducir brotación	Alto
	Muy Alto: Las temperaturas se presentan en el rango óptimo de <i>D. citri</i> entre los 25 y 28 oC, además de tener Humedades relativas bajas, menores al 50% y sin presencia de lluvias. La huerta es joven menor a los 5 años, con prácticas de poda continua y un mal manejo fitosanitario	Muy Alto

6.3.7 Análisis jerárquico del proceso epidemiológico de distribución de Huanglongbing

La jerarquía de criterios está compuesta por los componentes del sistema epidemiológico asociado al Huanglongbing (Figura 30).

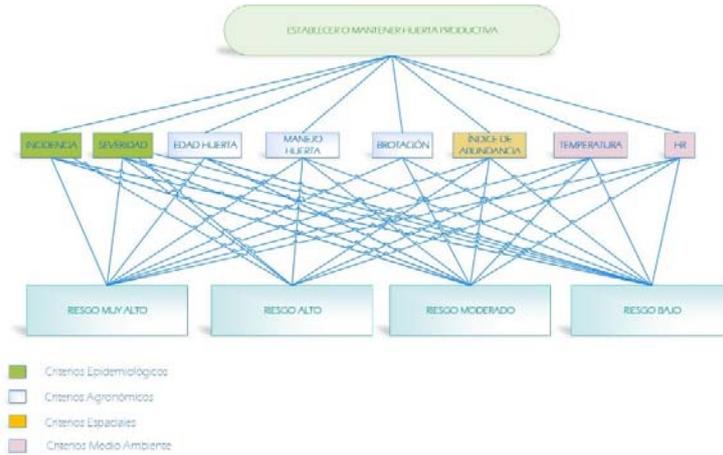


Figura 30. Jerarquias de criterios del análisis del sistema epidemiológico asociado a Huanglongbing

Cuadro 3. Matriz de criterios normalizados para el análisis del sistema epidemiológico

	INCIDENCIA	SEVERIDAD	EDAD	MANEJO	BROTAÇÃO	ABUNDANCIA	HUMEDAD	TEMPERATURA	PONDERACIÓN
INCIDENCIA	0.1718	0.1141	0.2368	0.2720	0.1933	0.1875	0.2647	0.1875	0.2035
SEVERIDAD	0.5153	0.3424	0.2368	0.2720	0.3479	0.3375	0.2647	0.2625	0.3224
EDAD	0.0191	0.0380	0.0263	0.0302	0.0129	0.0125	0.0294	0.0125	0.0226
MANEJO	0.1718	0.3424	0.2368	0.2720	0.3479	0.3375	0.1471	0.2625	0.2648
BROTAÇÃO	0.0344	0.0380	0.0789	0.0302	0.0387	0.0375	0.0882	0.1875	0.0667
ABUNDANCIA	0.0344	0.0380	0.0789	0.0302	0.0387	0.0375	0.0882	0.0375	0.0479
HUMEDAD	0.0191	0.0380	0.0263	0.0544	0.0129	0.0125	0.0294	0.0125	0.0256
TEMPERATURA	0.0344	0.0489	0.0789	0.0389	0.0077	0.0375	0.0882	0.0375	0.0465

$\lambda_{max}=9.0741$ $CR=0.1033$ $CI=0.1534$

Para la construcción de matriz de criterios (cuadro 3) se tomaron en cuenta consideraciones epidemiológicas analizadas de cada una de las variables en el área de estudio y los criterios establecidos por la escala propuesta por Saaty (1990). La consistencia de los criterios

ponderados definidos se verifica de acuerdo a los parámetros de CR (relación de consistencia) y CI (índice de consistencia) determinados por la λ_{max} de cada matriz.

El cuadro 3 muestra que los pesos ponderados de la severidad corresponden al criterio de mayor importancia con un 32% en el análisis epidemiológico, un 26% corresponde a las condiciones del manejo de la huerta, seguido de un 20% de la variable de la incidencia, es decir, que los criterios epidemiológicos en conjunto con el manejo agronómico pueden aportar hasta el 80% del índice de riesgo epidemiológico, este resultado concuerda con lo propuesto por Flores-Sánchez *et al* (2017) donde define el concepto de cronicidad de una epidemia. El restante 20% se distribuye en orden de importancia por los criterios de brotación, temperatura, humedad y edad de la huerta.

Con fundamento en los niveles de jerarquías y dadas las escalas establecidas para el análisis de las variables muestreadas y en las opciones establecidas para determinar el riesgo, se construyeron las matrices para los criterios individuales y los pesos establecidos de acuerdo a su importancia epidemiológica.

Cuadro 4. Ponderaciones e índices de consistencia definidas para los criterios univariados

RIESGO/CRITERIO	INCIDENCIA	SEVERIDAD	EDAD	MANEJO	BROTACIÓN	ABUNDANCIA	HUMEDAD	TEMPERATURA
NULO	5.4005	5.4005	5.4005	5.4005	5.4005	5.4005	5.4005	5.4005
BAJO	0.0843	0.0843	0.0843	0.0843	0.0843	0.0843	0.0843	0.0843
INTERMEDIO	0.1001	0.1001	0.1001	0.1001	0.1001	0.1001	0.1001	0.1001
ALTO	5.4005	5.4005	5.4005	5.4005	5.4005	5.4005	5.4005	5.4005
MUY ALTO	0.0843	0.0843	0.0843	0.0843	0.0843	0.0843	0.0843	0.0843
λ_{max}	0.1001	0.1001	0.1001	0.1001	0.1001	0.1001	0.1001	0.1001
CR	5.4005	5.4005	5.4005	5.4005	5.4005	5.4005	5.4005	5.4005
CI	0.0843	0.0843	0.0843	0.0843	0.0843	0.0843	0.0843	0.0843

La combinación matricial de los criterios e índices univariados da origen al vector de priorización final (Cuadro 5), que determina los rangos para establecer el riesgo.

Cuadro 5. Matriz de priorización del riesgo para la dispersión de Huanglongbing

	Nulo	Menor (0-0.027)
	Bajo	Bajo (0.067-0.1309)
	Intermedio	Intermedio (0.140-0.2732)
	Alto	Alto (0.280-0.490)
	Muy Alto	Mayor a 0.5013

Tomando como fundamento el vector de priorización de riesgo y comparados los criterios con los valores muestreados en campo, se obtuvieron los mapas de riesgo determinados para cada una de las fechas de muestreo.

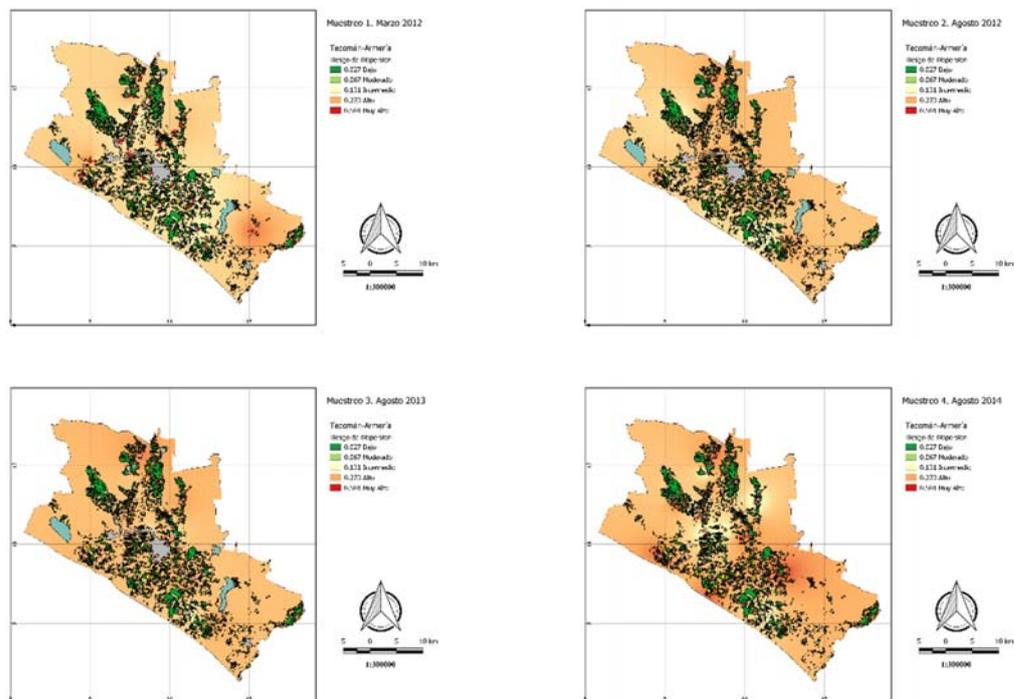


Figura 31. Mapas de dispersión de riesgo para los muestreos 2012, 2013 y 2014

Considerando los resultados de la figura 31, la región limonera de Tecomán y Armería debe considerarse como una zona de alto riesgo para la dispersión del Huanglongbing, así lo establece el análisis epidemiológico de las variables asociadas a Huanglongbing, lo que es congruente con las condiciones físicas donde se establece la región limonera del estado de Colima, que presenta condiciones óptimas para el desarrollo del vector y del hospedante, este resultado coincide con lo reportado por Flores-Sánchez *et al* (2017, 2016).

Se observa que desde 2012 un año después de la primera detección, el riesgo se mantiene en niveles de altos a muy altos, en relación a la incidencia de la enfermedad en los huertos de la zona, lo que se traduce en una amplia distribución espacial. Esta razón conlleva a la definición de zona endémica de Huanglongbing a Colima, situación reconocida por SENASICA en 2012.

Para los años 2013 y 2014 estos valores de riesgo muy alto se acentúan y se dispersan, lo cual coincide con los incrementos en la severidad y con los huertos en donde los propietarios desarrollan un manejo fitosanitario deficiente. Para el muestreo de 2014 es notoria la aparición de puntos con valores de riesgo de moderado a intermedio, lo que se atribuye principalmente a la sustitución de huertas, mismas que se establecieron con seguimientos fitosanitarios más riguroso, por lo que los valores de incidencia, severidad y manejo se mantuvieron en valores de moderados a intermedios.

6.5. Conclusiones

1. Se demuestra la alta susceptibilidad de la región citrícola de Tecomán y Armería debido a la confluencia de condiciones óptimas respecto elementos físicos del clima, amplia

disponibilidad y susceptibilidad del hospedante, altas poblaciones del vector, manejo agronómico condicionante de alto riesgo, lo que permitió el rápido establecimiento de la bacteria *Candidatus Liberibacter asiaticus*.

2. Los criterios epidemiológicos de la incidencia y la severidad determinan en un 50% el índice de riesgo de dispersión. Si se consideran estas variables epidemiológicas asociadas al manejo agronómico de la huerta puede llegar a establecer hasta el 80% del índice de riesgo.
3. Los índices de incidencia, severidad y manejo agronómico corroboran la rápida dispersión y establecimiento del huanglongbing en la región de Tecomán y Armería, fundamentalmente debido a que rápidamente se alcanzaron los umbrales económicos para el Huanglongbing, originado que la estrategia de erradicación no fuera aplicada.
4. Para el manejo de *D. citri* y del Huanglongbing de acuerdo a criterios epidemiológicos dados en la zona, es necesario aprovechar las ventanas naturales presentes a través del año que permitirían un manejo regional del vector, aprovechando la susceptibilidad de *D. citri* a altas humedades relativas, pero sobre todo, uniformizando en la región las prácticas agronómicas que detonan el incremento en el riesgo, tales como la inducción de brotación a través de podas y fertilizaciones, es deseable, que estas prácticas se conjunten con un buen manejo fitosanitario a nivel local y regional.
5. La metodología del análisis jerárquico de procesos para el análisis de sistemas epidemiológicos, es una opción analítica viable sobre todo en situaciones de sistemas preendémicos o se da la falta de información estadística limite la aplicación de metodologías basadas en parámetros probabilísticos clásicos, es decir, en el contexto de plagas cuarentenarias, bajo vigilancia fitosanitaria o en zonas con detecciones de plagas no presentes en regiones de interés.

6. El análisis jerarquico de procesos es una alternativa confiable para realizar análisis epidemiológico y delimitar los riesgos fitosanitarios debido a que se fundamenta en estudios multivariados de un sistema epidemiológico.

Bibliografía consultada

- Bassanezi, R. B. (2010). epidemiology of Huanglongbing and its implications on disease management, 5.
- Bové, J. M. (2006). Huanglongbing: a destructive, newly-emerging, century-old disease of citrus. *journal of plant pathology*, 88(1), 7–37. <https://doi.org/10.4454/jpp.v88i1.828>
- Centro nacional de estimación, prevención y reducción del riesgo de desastres (cenepred). (2015). documento: escenarios de riesgos por bajas temperaturas 2015: sector salud. recuperado el 6 de noviembre de 2018, de <http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/pdf/esp/doc2622/doc2622.htm>
- Cooke, B. M., Jones, D. G., y Kaye, B. (Eds.). (2006). *The Epidemiology Of Plant Diseases*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/1-4020-4581-6>
- Flores Sánchez, J. L. (2016). Epidemiología del HLB bajo tres escenarios regionales en México. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados, Montecillos. Estado de México. 289 p.
- Flores-Sanchez, J., Mora-Aguilera, G., Loeza-Kuk, E., López-Arroyo, J. I., Gutierrez Espinosa, M. A., Dominguez-Monge, S., ... Robles-García, P. (2017). Diffusion model for describing the regional spread of Huanglongbing from first-reported outbreaks and basing an area wide disease management strategy. *Plant Disease*, 101. <https://doi.org/10.1094/PDIS-04-16-0418-RE>
- Glur, C. (2018). Ahp: analytic hierarchy process (versión 0.2.12). recuperado de <https://cran.r-project.org/package=ahp>
- Hall, D. G., Wenninger, E. J., y Hentz, M. G. (2011). Temperature studies with the Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri*: cold hardiness and temperature thresholds for

- oviposition. *Journal of Insect Science (Online)*, 11, 83.
<https://doi.org/10.1673/031.011.8301>
- Höfer, t., Sunak, y., Siddique, h., y madlener, r. (2016). wind farm siting using a spatial analytic hierarchy process approach: a case study of the städtereion aachen. *applied energy*, 163, 222–243. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.138>
- Huang, l., zhu, b., y han, b. (2013). erp implementation risk assessment based on analytic hierarchy process. en z. zhang, r. zhang, y j. zhang (eds.), *liss 2012* (pp. 287–292). springer berlin heidelberg.
- INEGI. (2017). Climatología. Recuperado el 4 de agosto de 2017, de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/clima/default.aspx>
- Joseph - Marie Bové, y Núria Duran-Vila. (2015, octubre 15). citrus Huanglongbing is an emerging disease transmitted by psyllid vectors. can it be prevented? if not, can it be manage. recuperado el 15 de octubre de 2015, de <http://ciheam.org/images/ciheam/pdfs/publications/lv/w133/018%20-%20bov.pdf>
- Mora-Aguilera, G., Acevedo-Sánchez, G., Flores-Sanchez, J., González-Gómez, R., y Robles-García, P. (2013). *Applied Epidemiology to Plant Disease Risk Analyses*.
- Mora-Aguilera, g., flores-sánchez, j., Acevedo-Sánchez, g., domínguez-monge, s., Oropeza-salin, c., flores-olivas, a., ... robles-garcía, p. (2014). vigilancia epidemiológica y estatus actual del amarillamiento letal del cocotero, punta morada de la papa y Huanglongbing de los cítricos (Huanglongbing) en méxico. *revista mexicana de fitopatología*, 32(2), 120–131.
- Mora-Aguilera, G., Robles-García, G., López-Arroyo, J. I., Flores-Sánchez, J., Acevedo-Sánchez, G., & E González-Gómez, L.-K. (2016). Situación Actual y Perspectivas

- del Manejo del HLB de los Cítricos Current situation and Perspectives for Management of Citrus HLB. *Revista mexicana de fitopatología*, 32, 108–119.
- Robles-Gonzalez, M. M., Velazquez-Monreal, J. ., Orozco-Santos, M., Manzanilla-Ramírez, M. A., Flores-Virgen, r., Arredondo-Bernal, h., Rodríguez-Acevedo, j. i. (2011). bioecología del psilido asiático de los cítricos *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Psyllidae) en limón mexicano en Colima. Tecoman, COLIMA.
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: THE analytic hierarchy process. *European journal of operational research*, 48(1), 9–26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-i](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-i)
- Sagarpa. (2009). Norma Oficial Mexicana de Emergencia NOM-EM-047-FITO-2009. Recuperado el 5 de noviembre de 2018, de <http://publico.senasica.gob.mx/?Doc=19617>
- SIAP-SAGARPA. (2014). Producción anual agrícola - datos.gob.mx/busca. Recuperado el 5 de noviembre de 2018, de <https://datos.gob.mx/busca/dataset/produccion-anual-agricola>
- 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*, 96(1), 36–47. <https://doi.org/10.1653/024.096.0105>
- Veisi, H., Liaghati, H., y Alipour, A. (2016). Developing an ethics-based approach to indicators of sustainable agriculture using analytic hierarchy process (AHP).

Ecological INDICATORS, 60, 644–654.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.08.012>

Yagmur, L. (2016). Multi-criteria evaluation and priority analysis for localization equipment in a thermal power plant using the AHP (analytic hierarchy process). *Energy*, 94, 476–482. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.11.011>

