

Validation of a Sustainable Integrated Agronomic Management (MAIS) plan to improve orange tree productivity in regions affected by Huanglongbing (HLB)

Karla Mariany Hernández-Muñoz¹

Gustavo Almaguer Vargas^{2*}

Humberto Arenas Reyes¹

Abstract

Orange cultivation (*Citrus X sinensis* (L.) Osbeck) is a key activity in the economy of Mexican citrus-growing regions; however, its sustainability is threatened by the spread of Huanglongbing (HLB), an incurable disease associated with reduced productivity and orchard longevity. This research aimed to systematize, apply, and validate a Sustainable Integrated Agronomic Management Plan (MAIS) to mitigate the effects of HLB and strengthen the resilience of the production system. It was implemented in eight demonstration plots located in the municipalities of Álamo Temapache, Veracruz, and Ciudad Fernández, San Luis Potosí. Starting with a technical-productive diagnosis in each plot, technological packages were developed for each one, including foliar and soil fertilization based on soil analysis, sanitary pruning, integrated pest and disease management, and the establishment of cover crops with an agroecological function. The results showed that, at a minimum, average yield doubled and health and sprouting improved, even in orchards with severe infestations. It was concluded that a comprehensive management plan allows for coexistence with HLB while maintaining high production levels.

Keywords: *Citrus X sinensis* (L.), *Diaphorina citri*, plant nutrition, technology transfer.

Validación de un plan de Manejo Agronómico Integral Sostenible (MAIS) para mejorar la productividad del naranjo en regiones afectadas por Huanglongbing (HLB)

Resumen

El cultivo del naranjo (*Citrus X sinensis* (L.) Osbeck) es una actividad clave en la economía de regiones citrícolas mexicanas; sin embargo, su permanencia se ve amenazada por la expansión del Huanglongbing (HLB), enfermedad incurable asociada a la reducción de la productividad y longevidad de los huertos. Esta investigación tuvo como objetivo sistematizar, aplicar y validar un Plan de Manejo Agronómico Integral Sostenible (MAIS) para mitigar los efectos del HLB y fortalecer la resiliencia del sistema productivo. Se aplicó en ocho parcelas demostrativas ubicadas en los municipios de Álamo Temapache, Veracruz, y Ciudad Fernández, San Luis Potosí. Se partió de un diagnóstico técnico-productivo en cada parcela, se desarrollaron paquetes tecnológicos para cada una de ellas, que incluyeron fertilización foliar y edáfica con base en análisis de suelo, podas sanitarias, manejo integrado de plagas y enfermedades y el establecimiento de coberturas vegetales con función agroecológica. Los resultados mostraron que al menos, se duplicó el rendimiento promedio y se mejoró la sanidad, la brotación, incluso en huertos con afectaciones severas. Se concluye que un plan de manejo integral permite convivir con el HLB y tener niveles productivos altos.

Palabras clave: *Citrus X sinensis* (L.), *Diaphorina citri*, dragón amarillo, nutrición vegetal, parcelas demostrativas, transferencia tecnológica.

¹Asociación Nacional de Procesadores de Cítricos A. C. Insurgentes Sur 863, piso 7, Col. Nápoles, Benito Juárez, Ciudad de México. C. P. 03810, México.

²Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Fitotecnia, Carretera México-Texcoco km 38.5, C. P. 56230, Chapingo, Texcoco Edo. de México. México.

*Corresponding author: galmaguerv@chapingo.mx

Introduction

Mexico ranks among the world's leading orange producers. According to the SIAP's monthly report on agricultural product scenarios (2024), the planted area reached 353,327 hectares, a 0.5% increase compared to the previous year. Veracruz is the leading producing state, accounting for 48.6% of the national area, followed by Puebla, Tamaulipas, and San Luis Potosí, which together account for 77.5% of the cultivated area.

Despite the increase in planted area, the harvested one in 2024 was 268,819 ha, representing a decrease of 1.6% compared to the previous year. National production also fell by 6.6%, registering 3,357,117 tons, with a drop in yield from 13.16 to 12.49 t·ha⁻¹. This reduction is mainly associated with phytosanitary problems and adverse weather conditions. 2,000 surveys conducted in Álamo Temapache, Veracruz; Ciudad Fernández, San Luis Potosí, and Papantla demonstrate that yields have decreased by more than 60%, which has been confirmed by Gómez (2023).

One of the main challenges for orange production in Mexico and globally is Huanglongbing (HLB), also known as yellow dragon disease. This disease, caused by the bacterium *Candidatus Liberibacter asiaticus* (CLas) and transmitted by the Asian psyllid (*Diaphorina citri*), affects fruit quality, reduces tree lifespan and yield, and causes significant economic losses. Bove (2006) states that it is the most destructive disease that citrus fruits can suffer.

HLB was first detected in Mexico in 2009 in Tizimín, Yucatán (Robles et al., 2017), and since then, its presence has progressively increased (Flóres Sánchez et al., 2025).

In addition, recent climatic conditions have contributed to accentuating the effects of HLB. Since 2018, there has been a clear decrease in annual rainfall in key citrus-growing areas, such as Álamo Temapache, Veracruz, one of the regions with the largest area dedicated to orange cultivation, where a constant drop in rainfall levels was recorded, with critical points in 2019 and 2023, when rainfall was below 1,000 mm per year, showing only a slight recovery in 2024 (Figure 1).

Given the threat posed by HLB, several researchers have explored strategies for its management and control, addressing both the understanding of the disease and the development of alternatives to

Introducción

México se ubica entre los principales productores de naranja a nivel mundial. Según el reporte mensual de escenarios de productos agroalimentarios del SIAP (2024), la superficie sembrada alcanzó las 353 327 hectáreas, con un crecimiento del 0.5 % respecto al año anterior. Veracruz es el principal estado productor con 48.6 % de la superficie nacional, seguido por Puebla, Tamaulipas y San Luis Potosí, que en conjunto concentran el 77.5 % de la superficie cultivada.

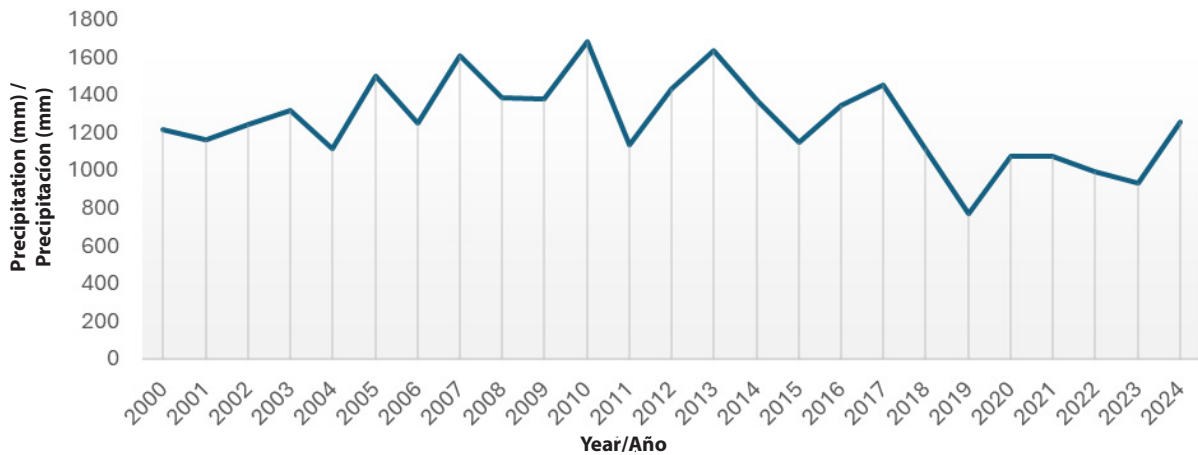
A pesar del incremento en superficie sembrada, la superficie cosechada en 2024 fue de 268 819 ha, lo que representó una disminución del 1.6 % respecto al año anterior. La producción nacional también cayó un 6.6 %, registrando 3 357 117 toneladas, con una baja en el rendimiento de 13.16 a 12.49 t·ha⁻¹. Esta reducción se asocia principalmente a problemas fitosanitarios y condiciones climáticas adversas. 2000 encuestas aplicadas en Álamo Temapache, Veracruz, Cd. Fernández, SLP y Papantla, demuestran que el rendimiento ha disminuido en más del 60 %, lo cual ha sido ratificado por Gómez (2023).

Uno de los principales retos para la producción de naranja en México y a nivel global es el Huanglongbing (HLB), también conocido como enfermedad del dragón amarillo. Esta enfermedad, causada por la bacteria *Candidatus Liberibacter asiaticus* (CLas) y transmitida por el psílido asiático (*Diaphorina citri*), afecta la calidad del fruto, reduce la longevidad del árbol y el rendimiento, así como genera pérdidas económicas importantes. Bove (2006) menciona que es la enfermedad más destructiva que pueden tener los cítricos.

El HLB fue detectado en México por primera vez en 2009 en Tizimín, Yucatán (Robles et al., 2017), y desde entonces, su presencia ha aumentado progresivamente (Flóres Sánchez et al., 2025).

Aunado a esto, las condiciones climáticas recientes han contribuido a acentuar los efectos del HLB. Desde 2018 se ha observado una clara disminución en la precipitación anual en zonas clave para la citricultura, como es el caso de Álamo Temapache, Veracruz, una de las regiones con mayor superficie dedicada al cultivo de naranja, donde se registró una caída constante en los niveles de lluvia, con puntos críticos en 2019 y 2023, cuando la precipitación estu-

Figure 1. Annual rainfall in Álamo Temapache
Figura 1. Precipitación anual de Álamo Temapache



Source: Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER) NASA. Data Access Viewer.
Fuente: Predicción de los recursos energéticos mundiales (energía) de la NASA. Visor de acceso a datos.

mitigate its impact on citrus cultivation. For example, alterations in citrus leaves infected by *Candidatus Liberibacter asiaticus* have been analyzed from a physiological and anatomical perspective, providing key information on disease progression and its effect on tree functionality. These studies have revealed structural changes in vascular tissues, affecting nutrient transport and, consequently, weakening the plant (Esquivel et al., 2012).

On the other hand, recent research has evaluated the role of balanced nutrition in the resistance of citrus trees to HLB. Pérez et al. (2024) conclude that trees with adequate fertilization and stimulation of their defense mechanisms show greater tolerance to the disease (Wang et al., 2022), a finding attributed to the differential expression of genes involved in the plant's immune response, the influence of agroclimatic factors, and the interaction between rootstock and tree age. Along the same lines, it has been shown that an integrated agronomic approach, combining the application of defense elicitors, nitrogen fertilization, and the use of organic amendments such as compost, is capable of significantly slowing the progression of HLB.

This synergy of practices not only maintains tree health and productive performance in already diseased plants, but also protects new plantings from infection, positioning itself as a practical and optimizable strategy for citrus growers (Li et al., 2019).

vo por debajo de los 1 000 mm anuales, presentando apenas una ligera recuperación en 2024 (Figura 1).

Ante la amenaza que representa el HLB, diversos investigadores han explorado estrategias para su manejo y control, abordando tanto la comprensión de la enfermedad como el desarrollo de alternativas para mitigar su impacto en la citricultura. Por ejemplo, se han analizado las alteraciones en hojas de cítricos infectadas por *Candidatus Liberibacter asiaticus* desde un enfoque fisiológico y anatómico, proporcionando información clave sobre la progresión de la enfermedad y su efecto en la funcionalidad del árbol. Dichos estudios han evidenciado cambios estructurales en los tejidos vasculares, afectando el transporte de nutrientes y, en consecuencia, debilitando la planta (Esquivel et al., 2012).

Por otro lado, investigaciones recientes han evaluado el papel de la nutrición balanceada en la resistencia de los cítricos frente al HLB. Pérez et al. (2024) concluye que los árboles con una adecuada fertilización y estimulación de sus mecanismos de defensa presentan una mayor tolerancia a la enfermedad (Wang et al., 2022), hallazgo que se atribuye a la expresión diferencial de genes involucrados en la respuesta inmune de la planta, la influencia de factores agroclimáticos y la interacción entre el patrón y la edad del árbol. En esta misma línea, se ha demostrado que un enfoque agronómico integrado,

Delving deeper into the synergy of agronomic practices, research has been conducted on combining pruning with foliar nutrition programs as a method to rejuvenate trees affected by HLB. In this context, the effects of severe pruning were evaluated in conjunction with the application of enhanced nutritional treatments, which included treatments included a mixture of micro and macronutrients and a micronutrient package supplemented with potassium nitrate or urea. The study results indicated that, although severe pruning did not prove to profitable in the medium term, the tree's vigorous regrowth response suggests that more moderate pruning could be an effective alternative for recovery. At the same time, foliar nutrition programs were shown to generate measurable yield benefits (Rouse et al., 2017).

For a long time, various studies have pointed out that disease management should be based on three main approaches: eradication of infected plants, control of the vector (*Diaphorina citri*), and the use of certified planting material. However, Mora et al. (2014) highlight that eradication of diseased trees has been largely ineffective due to the systemic spread of the bacteria, even in the roots, which hinders its complete elimination. Regarding vector control, Pineda et al. (2024) emphasize that this should not be addressed in isolation, but rather within an integrated management framework that considers crop phenology and plant-pathogen interaction and takes into account that most orange trees are already infected with CLAs.

Improving the productivity of orange cultivation in trees affected by Huanglongbing (HLB) requires a thorough rethinking of the cultivation practices used and, in general, of the entire production system. Traditional approaches have not proven to be sufficiently effective, being outdated both operationally and scientifically-technologically, mainly because they do not take into account new climatic conditions and the increased aggressiveness of pests and diseases (Trigo & Elverdin, 2019).

Particularly in the case of HLB, where the complexity of the problem requires a comprehensive, dynamic, and territorially adapted response, integrated agronomic management plans for demonstration plots are key tools for validating and transferring agronomic innovations. In Mexico, these plots have proven to be effective spaces for testing, adjusting,

que combina la aplicación de elicitores de defensa, fertilización nitrogenada y el uso de enmiendas orgánicas como el compost, es capaz de ralentizar significativamente el progreso del HLB.

Esta sinergia de prácticas no solo logra mantener la salud del árbol y el rendimiento productivo en plantas ya enfermas, sino que también protege a las nuevas plantaciones de la infección, posicionándose como una estrategia práctica y optimizable para los citricultores (Li et al., 2019).

Al profundizar en la sinergia de prácticas agronómicas, se ha investigado la combinación de podas con programas de nutrición foliar como método para rejuvenecer árboles afectados por HLB. En este contexto, se evaluaron los efectos de una poda severa junto con la aplicación de tratamientos nutricionales mejorados, los cuales incluían una mezcla de micro y macronutrientes y un paquete de micronutrientes complementado con nitrato de potasio o urea. Los resultados del estudio indicaron que, si bien la poda severa no demostró ser rentable a mediano plazo, la vigorosa respuesta de rebrote del árbol sugiere que podas más moderadas podrían ser una alternativa eficaz para su recuperación. De manera paralela, los programas de nutrición foliar demostraron generar beneficios medibles en el rendimiento (Rouse et al., 2017).

Durante mucho tiempo, diversos estudios han señalado que el manejo de la enfermedad debe basarse en tres enfoques principales: la erradicación de plantas infectadas, el control del vector (*Diaphorina citri*) y el uso de material certificado. Sin embargo, Mora et al. (2014) destacan que la erradicación de árboles enfermos ha sido poco efectiva debido a la diseminación sistémica de la bacteria, incluso en las raíces, lo que dificulta su eliminación total. Respecto al control del vector, Pineda et al. (2024) enfatizan que este no debe abordarse de manera aislada, sino dentro de un esquema de manejo integrado que considere la fenología del cultivo y la interacción planta-patógeno y considerar que la mayoría de los naranjos ya están infectados por el CLAs.

La mejora de la productividad del cultivo de naranja en árboles afectados por el Huanglongbing (HLB) exige un replanteamiento profundo de las prácticas de cultivo utilizadas y en general, de todo el sistema de producción. Los esquemas tradicionales no han demostrado una adecuada efectividad,

and disseminating new management practices, while also acting as bridges among the scientific, productive, and financial sectors (Rendón et al., 2016).

From this perspective, the present research aims to generate and implement integrated agronomic management strategies to improve orange crop productivity in regions affected by HLB in Mexico. These strategies seek not only to increase yield and production quality, but also to strengthen the sustainability and resilience of the citrus system by promoting practices adapted to the phytosanitary and environmental challenges currently facing the sector.

Methodological Approach and Materials

General methodological approach

This study was developed through the implementation and validation of the Sustainable Integrated Agronomic Management Plan (MAIS) in eight demonstration plots located in Veracruz and San Luis Potosí. This approach was chosen because it allows for the evaluation of agronomic innovations under real field conditions, promotes direct interaction with producers, and facilitates practical learning processes in orchards affected by Huanglongbing (HLB).

The MAIS design stems from the recognition that HLB profoundly alters tree physiology, mainly by obstructing the phloem and limiting nutrient transport. To address this progressive deterioration, the plan integrates nutrition practices, soil management, vector control, sanitary pruning, and biological strategies aimed at reactivating the tree's metabolism. These practices are based on recent research (Torres et al., 2025; Millán et al., 2025), translated into innovations adapted to the producers' context.

Components of the Sustainable Integrated Agronomic Management Plan (MAIS)

The MAIS was developed based on an initial assessment that included soil analysis, the orchard's production history, and a survey administered to the producer. The following elements were then integrated from this foundation:

- **Initial diagnostic survey**

This provided information to know the general condition of the plot, previous management prac-

superados tanto en lo operativo como en lo científico-tecnológico, sobre todo, porque no consideran las nuevas condiciones climáticas y el incremento en agresividad de plagas y enfermedades (Trigo & Elverdín, 2019).

Particularmente en el caso del HLB, donde la complejidad de la problemática requiere una respuesta integral, dinámica y territorialmente adaptada, los planes de manejo agronómico integrales de parcelas demostrativas, se posicionan como herramientas clave para la validación y transferencia de innovaciones agronómicas. En México, estas parcelas han demostrado ser espacios eficaces para probar, ajustar y difundir nuevas prácticas de manejo, al mismo tiempo que actúan como puentes entre los sectores científico, productivo y financiero (Rendón et al., 2016).

Bajo esta perspectiva, la presente investigación tiene como objetivo generar e implementar estrategias de manejo agronómico integral para mejorar la productividad del cultivo de naranja en regiones afectadas por el HLB en México. Estas estrategias buscan no solo incrementar el rendimiento y la calidad de la producción, sino también fortalecer la sostenibilidad y la resiliencia del sistema citrícola, promoviendo prácticas adaptadas a los retos fitosanitarios y ambientales que enfrenta actualmente el sector.

Enfoque Metodológico y Materiales

Enfoque metodológico general

Este estudio se desarrolló mediante la implementación y validación del Plan de Manejo Agronómico Integral Sostenible (MAIS) en ocho parcelas demostrativas ubicadas en Veracruz y San Luis Potosí. El enfoque se eligió porque permite evaluar innovaciones agronómicas en condiciones reales de campo, favorece la interacción directa con productores y facilita procesos de aprendizaje práctico en huertos afectados por Huanglongbing (HLB).

El diseño del MAIS parte del reconocimiento de que el HLB altera profundamente la fisiología del árbol, principalmente al obstruir el floema y limitar el transporte de nutrientes. Para enfrentar este deterioro progresivo, el plan integra prácticas de nutrición, manejo del suelo, control del vector, podas sanitarias y estrategias biológicas que buscan reactivar el metabolismo del árbol. Estas prácticas se fundamenta-

tices and the producer's expectations, facilitating the adjustment of the recommendations.

- **Soil analysis**

It was used as a central tool to define the fertilization strategy and correct nutritional deficiencies exacerbated by HLB.

- **Root and foliar fertilization**

- a) *Root fertilization:*

It was applied throughout the year (March, June, August, October, and December) to compensate for the low absorption efficiency caused by the root damage characteristic of HLB. Soluble sources of N, K, Ca, and Mg were included, in addition to organic matter and biofertilizers that promote the recovery of the soil microbiota.

- b) *Foliar fertilization with and without biostimulants:*

This was aimed at improving photosynthesis, reducing oxidative stress, and promoting sprouting, fruit setting, and physiological balance. Amino acids, hormones, vitamins, seaweed extracts, and micronutrients such as zinc and manganese, essential for metabolism in affected trees, were used.

- **Soil, weed and cover crop management:**

Cover crops and selective weed management improve soil structure, regulate temperature, increase moisture retention, and contribute to the presence of beneficial organisms.

- **Integrated vector management (*Diaphorina citri*) included:**

- Systematic monitoring,
 - Biological control using *Tamarixia radiata*,
 - Low-impact insecticides based on entomopathogenic fungi,
 - Sticky traps,
 - Rotation of active ingredients.

Applications were concentrated in the critical months: February, June, August, September, and December.

- **Strategic pruning:**

They were carried out in February and July, with the purpose of:

ron en investigaciones recientes (Torres et al., 2025; Millán et al., 2025), traducidas en innovaciones adaptadas al contexto de los productores.

Componentes del Plan de Manejo Agronómico Integral Sostenible (MAIS)

El MAIS se construyó a partir de un diagnóstico inicial que incluyó análisis de suelo, la historia productiva del huerto y una encuesta aplicada al productor. A partir de esta base, se integraron los siguientes elementos:

- **Encuesta diagnóstica inicial**

Permitió conocer el estado general de la parcela, prácticas previas de manejo y expectativas del productor, facilitando el ajuste de las recomendaciones.

- **Análisis de suelo**

Se utilizó como herramienta central para definir la estrategia de fertilización y corregir deficiencias nutrimentales acentuadas por el HLB.

- **Fertilización radical y foliar**

- a) *Fertilización radical:*

Se aplicó a lo largo del año (marzo, junio, agosto, octubre y diciembre), con el objetivo de compensar la baja eficiencia de absorción causada por el daño radical propio del HLB. Se incluyeron fuentes solubles de N, K, Ca y Mg, además de materia orgánica y biofertilizantes que favorecen la recuperación de la microbiota del suelo.

- b) *Fertilización foliar con y sin bioestimulantes:*

Se orientó a mejorar la fotosíntesis, reducir estrés oxidativo y favorecer brotación, amarre de fruto y equilibrio fisiológico. Se emplearon aminoácidos, hormonas, vitaminas, extractos de algas y micronutrientes como Zn y Mn, esenciales para el metabolismo en árboles afectados.

- **Manejo del suelo, malezas y coberteras:**

Las coberturas y el manejo selectivo de arvenses mejoran la estructura del suelo, regulan temperatura, aumentan retención de humedad y contribuyen a la presencia de organismos benéficos.

- **Manejo integrado del vector (*Diaphorina citri*) incluyó:**

- Monitoreo sistemático,

Table 1. General characteristics of demonstration plots
Cuadro 1. Características generales de las parcelas demostrativas

Location / Localidad	Area (ha)/ Superficie (ha)	Description / Descripción
Instituto Tecnológico Superior de Álamo Temapache (ITSAT), Veracruz.	1.9	Vertisol and Calcisol soils, warm sub-humid climate, and 638 7 year old trees on sour rootstock (patrón cucho). / Suelos Vertisol y Calcisol, clima cálido subhúmedo y 638 árboles de 7 años sobre patrón cucho
Hidalgo Amajac, Álamo Temapache, Veracruz.	2	Cambisol soil and warm sub-humid climate. / Suelo Cambisol y clima cálido subhúmedo.
Úrsulo Galván "uno" (El Limonar), Temapache, Ver.	4.5	Fluvisol soil, drip irrigation and non-technical management; it functions as a control plot. / Suelo Fluvisol, riego por goteo y manejo no técnico; funciona como parcela testigo
El Cedral, Papantla, Veracruz	6.5	Vertisol soils and associated crops (forage soybeans, canavalia) as cover crops; without irrigation. / Suelos Vertisol y cultivos asociados (soya forrajera, canavalia) como coberturas; sin riego
El Refugio, Ciudad Fernández, San Luis Potosí (Three demonstration plots / Tres parcelas demostrativas).	5.05	Phaeozem soils, trees ~50 years old, micro-sprinkler irrigation and a historical yield of 4 t·ha ⁻¹ . / Suelos Phaeozem, árboles de ~50 años, riego por microaspersión y rendimiento histórico de 4 t·ha ⁻¹ .
La Reformita, Ciudad Fernández, San Luis Potosí	9	Phaeozem soils, trees ~30 years old, hot dry climate and micro-sprinkler irrigation. / Suelos Phaeozem, árboles de ~30 años, clima cálido seco y riego por microaspersión.

- Remove dry or infected branches,
- To induce vigorous growth,
- Improve ventilation and lighting,
- Facilitate penetration of plant protection products.

Pruning was accompanied by copper sealants and the removal or burning of cut material to prevent new infections.

Demonstration plots and their characteristics

The selected plots represented several edaphoclimatic contexts typical of the citrus sector. The diversity of soils, planting ages, and historical practices allowed the MAIS to be validated under real and contrasting conditions (Table 1).

Criteria for selecting plots

The plots were selected based on technical and strategic criteria to ensure that the implemented practices could be evaluated under conditions representative of the local citrus sector. The selection of plots was based on key factors which facilitated knowledge dissemination and the validation of agronomic strategies in an environment affected by Huanglong-bing (HLB).

- Control biológico mediante *Tamarixia radiata*,
- Insecticidas de bajo impacto a base de hongos entomopatógenos,
- Trampas pegajosas,
- Rotación de ingredientes activos.

Las aplicaciones se concentraron en los meses críticos: febrero, junio, agosto, septiembre y diciembre.

• Podas estratégicas:

- Se realizaron en febrero y julio, con el propósito de:
- Eliminar ramas secas o infectadas,
 - Inducir brotes vigorosos,
 - Mejorar ventilación e iluminación,
 - Facilitar penetración de productos fitosanitarios.

Las podas se acompañaron de selladores cúpricos y de la eliminación o quema del material cortado para evitar nuevas infecciones.

Parcelas demostrativas y sus características

Las parcelas seleccionadas representaron diversos contextos edafoclimáticos propios del sector cítrico. La diversidad de suelos, edades de plantación y prácticas históricas permitió validar el MAIS en con-

The criteria considered for the selection of the demonstration plots were the following:

1. Accessible and visible location, facilitating technology transfer.
2. Minimum area of one hectare, to ensure agronomic representativeness.
3. History of low productivity, ideal for evaluating the improvement induced by MAIS.
4. Ease of monitoring and producer participation, favoring the adoption of the management practices.

• **Adaptation of the MAIS to the conditions of each production unit**

The plan was adjusted based on the particular conditions of each production unit, considering both the results of the soil analysis and the information obtained through an initial diagnostic survey; the following factors were taken into account:

1. Soil type
2. Water availability
3. Age and density of the orchard
4. Climatic conditions
5. Survey results and nutritional analysis

• **Variables evaluated**

This research evaluated initial and final yields, which involved measuring treatment variables in each plot in 2023, at the end of 2024, and from January to March 2025.

Yield was estimated by:

- **Initial yield:** quantified by counting the fruits that had an approximate diameter of one centimeter in one square meter, for which a square with this measurement was used, at each of the cardinal points at a height of two meters and quantifying all the fruits that were within that square.
- **Expected performance:** the number of fruits present in the four cardinal points was multiplied by the number of trees per hectare by the estimated weight of the fruits at maturity, which is 220 grams.
- **Final performance:** All the fruits present on 10 randomly selected trees within the evaluated hectare were counted, then ten randomly se-

ditiones reales y contrastantes (Cuadro 1).

Criterios de selección de las parcelas

Las parcelas se eligieron atendiendo a criterios técnicos y estratégicos; con el objetivo de garantizar que las prácticas implementadas pudieran ser evaluadas en condiciones representativas del sector cítrico local. La elección de las parcelas respondió a factores clave que facilitaron la difusión del conocimiento y la validación de estrategias agronómicas en un entorno afectado por Huanglongbing (HLB).

Los criterios que se consideraron para la selección de las parcelas demostrativas fueron los siguientes:

1. Ubicación accesible y visible, que facilitara la transferencia tecnológica.
2. Superficie mínima de una hectárea, para asegurar representatividad agronómica.
3. Historial de baja productividad, ideal para evaluar la mejora inducida por el MAIS.
4. Facilidad de monitoreo y participación de productores, favoreciendo la adopción del manejo.

• **Adaptación del MAIS a las condiciones de cada unidad productiva**

El plan se ajustó con base en las condiciones particulares de cada unidad productiva, considerando tanto los resultados del análisis de suelo como la información obtenida mediante una encuesta diagnóstica inicial, se tomó en cuenta:

1. Tipo de suelo
2. Disponibilidad de agua
3. Edad y densidad del huerto
4. Condiciones climáticas
5. Resultados de la encuesta y análisis nutrimentales

• **Variables evaluadas**

En esta investigación se evaluaron el rendimiento inicial y final, que implicó medir las variables del tratamiento en cada parcela en 2023, al final de 2024 y de enero a marzo 2025.

El rendimiento se estimó mediante:

- **Rendimiento inicial:** se cuantificó contando los frutos que tuvieron un diámetro aproximado de un centímetro en un metro cuadrado para lo cual se utilizó un cuadro con esta medida, en cada uno

Table 2. Initial yield estimate.
Cuadro 2. Estimación inicial de rendimiento.

Demonstration plot/ Parcela demostrativa	2023 yield (t·ha ⁻¹)/ Rendimiento 2023(t·ha ⁻¹)	2024 yield (t·ha ⁻¹)/ Rendimiento 2024 (t·ha ⁻¹)	2025 yield (t·ha ⁻¹)/ Rendimiento estimado 2025 (t·ha ⁻¹)
Instituto Tecnológico Superior de Álamo Temapache, Ver.		0.51 (First production) / (Primera producción)	10.75
Hidalgo Amajac, Álamo Temapache, Ver.	13	12	15
Úrsulo Galván uno "El Limonar", Ver.	4	14	9.3
El Cedral, Ver.	3	7	28.4
Aguanosa, El Refugio, SLP.	2	7	19.25
La Caldera Vieja, El Refugio, SLP.	6.4	17	20.11
El Mezquite, El Refugio, SLP.	2	7	20.5
Alfredo Escobar, La Reformita, SLP.	1.0	7	20.8

lected fully ripe fruits were weighed and found to weigh an average of 220 grams each. The yield was calculated using the number of trees per hectare and multiplied by the fruit weight and the average number of fruits present on the 10 sampled trees.

Results and Discussion

Effectiveness of MAIS in yield recovery

The implementation of the Sustainable Integrated Agronomic Management Plan (MAIS) in demonstration plots allowed us to validate, under real field conditions, its effectiveness as a strategy to mitigate the effects of Huanglongbing (HLB) and improve the productivity of orange trees (*Citrus sinensis*). MAIS integrated nutritional, cultural, and phytosanitary practices adapted based on a comprehensive agronomic diagnosis, which included soil analysis, production history, balanced nutrition, fertilization with biostimulants, pest and disease management, and active collaboration with producers.

The results showed substantial increases in most of the plots (Table 2) For example, at Instituto Tecnológico Superior de Álamo Temapache, yields increased from a critical 0.51 t·ha⁻¹ to an estimated 10.75 t·ha⁻¹ for the 2024-2025 season, following the disciplined application of all the strategies in the plan. The recovery was attributed to the physiological strengthening of the trees through balanced fertilization, strategic pruning, and effective vector control.

Another representative case was "El Mezquite" plot, which, with an initial yield of 2 t·ha⁻¹ reached

de los puntos cardinales a una altura de dos metros y cuantificando todos los frutos que estaban dentro de dicho cuadro.

- **Rendimiento esperado:** se multiplicó el número de frutos presentes en los cuatro puntos cardinales por el número de árboles por hectárea por el peso estimado de los frutos en su etapa madura, que es 220 gramos.
- **Rendimiento final:** se contaron todos los frutos presentes en 10 árboles tomados al azar, dentro de la hectárea evaluada, posteriormente se pesaron diez frutos al azar completamente maduros y se observó que en promedio tuvieron 220 gramos cada uno. Se calculó el rendimiento con el número de árboles por hectárea y se multiplicó por el peso de fruto y el promedio de número de frutos presentes en los 10 árboles muestreados.

Resultados y Discusión

Efectividad del MAIS en la recuperación del rendimiento

La implementación del Plan de Manejo Agronómico Integral Sostenible (MAIS) en las parcelas demostrativas permitió validar, en condiciones reales de campo, su eficacia como estrategia para mitigar los efectos del Huanglongbing (HLB) y mejorar la productividad del naranjo (*Citrus sinensis*). El MAIS integró prácticas nutricionales, culturales y fitosanitarias adaptadas con base en un diagnóstico agronómico integral, que incluyó análisis de suelo, historial productivo, nutrición balanceada, fertilización con bioestimulantes,

20.5 t·ha⁻¹ after the timely incorporation of fertilization with biostimulants, plant cover crops, rejuvenation pruning, and drip irrigation. The Aguacanosa and Caldera Vieja plots (Cd. Fernández) also showed notable increases, reaching 19.25 and 20.11 t·ha⁻¹ respectively, through the strategic use of biostimulants and optimized irrigation. A similar trend was observed in “La Reformita,” SLP, which increased its yield from 10 to 20.8 t·ha⁻¹, thanks to technical intensification aligned with the crop’s phenological stage and site conditions.

In El Cedral (Papantla), the yield went from 3 to 28.4 t·ha⁻¹ as a result of adequate balanced nutrition management and sanitary pruning, which favored fruit setting.

In particular, balanced nutrition, the incorporation of cover crops, and the use of inducers as part of the MAIS played a key role in the recovery of productivity. These results coincide with those reported by Pérez et al. (2024), who highlight that adequate nutrient supply and the stimulation of physiological defense mechanisms can partially mitigate the effects of *Candidatus Liberibacter asiaticus* on citrus yield.

The only case where a lower increase in yield was obtained was in the Hidalgo Amajac plot, where 13 t·ha⁻¹ became 15 t·ha⁻¹. Although the increase was smaller, this result suggests a stabilizing effect of MAIS under adverse climatic conditions, which is also considered relevant when discussing productive resilience.

In contrast, at the El Limonar plot (Úrsulo Galván), a final yield was of 9.3 t·ha⁻¹ was estimated, despite having reached 14 t·ha⁻¹ at an intermediate stage. The drop was attributed to the producer’s decision to modify the technical treatment and incorporate traditional commercial products (“miracle”), reflecting a cultural resistance to technological adoption. This phenomenon is common in rural areas and highlights the importance of sustained technical support, timely monitoring, and building trust to ensure the correct implementation of management practices.

This finding is related to that reported by Esquivel et al. (2012), who demonstrated that HLB damage to the vascular system significantly reduces water and nutrient transport, leading to a progressive decrease in productivity. Thus, a direct comparison between

manejo de plagas y enfermedades, y colaboración activa con los productores.

Los resultados mostraron incrementos sustanciales en la mayoría de las parcelas (Cuadro 2). Por ejemplo, en el Instituto Tecnológico Superior de Álamo Temapache, el rendimiento pasó de un crítico 0.51 t·ha⁻¹ a una estimación de 10.75 t·ha⁻¹ para la temporada 2024-2025, tras la aplicación disciplinada de todas las estrategias del plan. La recuperación se atribuyó al fortalecimiento fisiológico del árbol mediante una fertilización balanceada, podas estratégicas y control eficaz del vector.

Otro caso representativo fue en la parcela “El Mezquite”, que con un rendimiento inicial de 2 t·ha⁻¹ alcanzó 20.5 t·ha⁻¹ tras la incorporación oportuna de la fertilización con bioestimulantes, coberturas vegetales, poda de rejuvenecimiento, y riego por goteo. Las parcelas Aguacanosa y Caldera Vieja (Cd. Fernández) también reflejaron incrementos notables, alcanzando 19.25 y 20.11 t·ha⁻¹ respectivamente, mediante el uso estratégico de bioestimulantes y la optimización del riego. Similar fue el comportamiento en “La Reformita”, SLP, que de tener un rendimiento de 10 t·ha⁻¹ aumentó a 20.8 t·ha⁻¹, gracias a la intensificación técnica alineada con el estado fenológico del cultivo y las condiciones del sitio.

En El Cedral (Papantla), el rendimiento pasó de 3 a 28.4 t·ha⁻¹, resultado de la adecuada gestión de nutrición balanceada y podas sanitarias, que favorecieron el amarre de fruto.

En particular, la nutrición balanceada, la incorporación de coberturas vegetales y el uso de inductores como parte del MAIS, jugaron un papel clave en la recuperación de la productividad. Estos resultados coinciden con lo reportado por Pérez et al. (2024), quienes destacan que el adecuado suministro de nutrientes y la estimulación de mecanismos de defensa fisiológica pueden mitigar parcialmente los efectos del *Candidatus Liberibacter asiaticus* sobre el rendimiento del cítrico.

El único caso donde se obtuvo un rendimiento con un menor incremento fue en la parcela de Hidalgo Amajac, donde de 13 t·ha⁻¹ obtuvo 15 t·ha⁻¹. Aunque el incremento fue menor, este resultado sugiere un efecto estabilizador del MAIS bajo condiciones climáticas adversas, lo cual también se considera relevante al hablar de resiliencia productiva.

trees managed with MAIS and the control group highlights that technological adoption, when contextualized and supported by technical expertise, can make a critical difference in crop sustainability.

This study contributes to the ongoing debate on HLB management in Mexico, proposing an alternative approach to the traditional model of eradication and vector control as the only strategies. MAIS is based on the principle of coexisting with the disease, seeking to maintain the tree's functionality by stimulating its physiology.

Furthermore, the choice of demonstration plots as a methodological platform allowed for the validation of sustainable agronomic practices in diverse climatic conditions and with the direct participation of producers. This extension strategy contrasts positively with traditional vertical models, whose effectiveness has been limited by a lack of institutional coordination and participatory assessments (Trigo & Elverdin, 2019).

The results also reinforce the proposal of Pineda et al. (2024), who argue that vector management should be part of a comprehensive approach that considers the agroecological environment, crop phenology, and plant-pathogen interaction. In this sense, MAIS aligns with the principles of agroecology applied to complex citrus systems and provides a concrete, evidence-based proposal to strengthen the resilience of citrus agroecosystems to HLB.

This study contributes to the state of the art by validating in the field a participatory methodological model, supported by technical evidence and adaptable to different agroecological conditions. It contrasts with other research that prioritizes unidimensional control (nutritional, phytosanitary, or biological, separately), by demonstrating that the strategic integration of practices and consistent application are crucial for success.

Conclusion

This research demonstrated that sustainable integrated agronomic management (MAIS) is a technically and socially viable strategy for improving the productivity of orange (*Citrus sinensis*) crops and coexisting with Huanglongbing (HLB). Its implementation allowed productivity to be recovered in eight

En contraste, en la parcela El Limonar (Úrsulo Galván), se estimó un rendimiento final de 9.3 t·ha⁻¹, a pesar de haber alcanzado 14 t·ha⁻¹ en un momento intermedio. La caída se atribuyó a la decisión del productor de modificar el tratamiento técnico e incorporar productos comerciales de uso tradicional ("milagro"), lo que reflejó la existencia de una resistencia cultural a la adopción tecnológica. Este fenómeno es común en el campo y resalta la importancia del acompañamiento técnico sostenido, el seguimiento puntual y la construcción de la confianza para garantizar una correcta implementación del manejo.

Este hallazgo se relaciona con lo planteado por Esquivel et al. (2012), quienes demostraron que el daño causado por el HLB al sistema vascular reduce significativamente el transporte de agua y nutrientes, provocando una disminución progresiva en la productividad. Así, la comparación directa entre árboles manejados con el MAIS y el testigo pone en evidencia que la adopción tecnológica, cuando se contextualiza y se acompaña técnicamente, puede marcar una diferencia crítica en la sostenibilidad del cultivo.

Este estudio contribuye al debate actual sobre el manejo del HLB en México, proponiendo un enfoque alternativo al modelo tradicional de erradicación y control del vector como estrategias únicas. El MAIS se basa en el principio de convivencia con la enfermedad, buscando mantener la funcionalidad del árbol mediante la estimulación de su fisiología.

Además, la elección de parcelas demostrativas como plataforma metodológica permitió validar prácticas agronómicas sostenibles en condiciones climáticas diversas y con participación directa de los productores. Esta estrategia de extensión contrasta positivamente con los modelos verticales tradicionales, cuya efectividad se ha visto limitada por la falta de articulación institucional y diagnósticos participativos (Trigo & Elverdin, 2019).

Los resultados también refuerzan la propuesta de Pineda et al. (2024), quienes argumentan que el manejo del vector debe formar parte de un enfoque integral que considere el entorno agroecológico, la fenología del cultivo y la interacción planta-patógeno. En este sentido, el MAIS se alinea con los principios de la agroecología aplicada a sistemas citrícolas complejos y aporta una propuesta concreta, basada en evidencia, para fortalecer la resiliencia de los

demonstration plots through the use of practices adapted to the specific conditions of each production unit. It was found that the success of the model depends both on the complete and consistent application of the sustainable integrated agronomic management plan and on the participation of producers in the process. The results validate the hypothesis, showing that it is possible to coexist with HLB through sustainable strategies that strengthen the resilience of the production system.

Methodologically, the use of demonstration plots and the collaborative approach between technicians and producers has not only enabled the effective transfer of technology, but also the generation of situated knowledge. This proposal promotes a paradigm shift: from simple technical prescription to the co-construction of adapted and sustainable solutions.

End of English version

References / Referencias

- Bove, J. M. 2006. Huanglongbing: a destructive, newly-emerging, century-old disease of citrus. *Journal of Plant Pathology*. 88 (1): 7-37
- Esquivel Chávez, F., Valdovinos Ponce, G., Mora Aguilera, G., Gómez Jaimes, R., Velázquez Monreal, J. J., Manzanilla Ramírez, M. Á., Flores Sánchez, J. L., & 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. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952012000800003&lng=es&tlng=es.
- Flores Sánchez, J. L., Mora Aguilera, G., Loeza Kuk, E., López Arroyo, J. I., Domínguez Monge, S., Acevedo Sánchez, G., & Robles García, P. (2015). Pérdidas en producción inducidas por *Candidatus Liberibacter asiaticus* en Limón Persa, en Yucatán México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 33(2), 195-210. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-33092015000200195
- Gómez C., M. A. (2023). Producción de naranja cae 50 % en Veracruz; estiman pérdidas por 16 mil mdp. *Imagen Agropecuaria*. <https://imagenagropecuaria.com/2023/produccion-de-naranja-cae-50-en-veracruz-estiman-perdidas-por-16-mil-mdp/>
- agroecosistemas cítricos ante el HLB.
- El presente estudio contribuye al estado del arte al validar en campo un modelo metodológico participativo, sustentado en evidencia técnica y adaptable a distintas condiciones agroecológicas. Contrasta con otras investigaciones que priorizan el control unidimensional (nutricional, fitosanitario o biológico por separado), al demostrar que la integración estratégica de prácticas y la constancia en su aplicación son determinantes para el éxito.

Conclusión

La presente investigación demostró que el manejo agronómico integral sostenible (MAIS) es una estrategia técnica y socialmente viable para mejorar la productividad del cultivo del naranjo (*Citrus sinensis*) y convivir con el Huanglongbing (HLB). Su implementación permitió recuperar la productividad en ocho parcelas demostrativas, mediante el uso de prácticas adaptadas a las condiciones específicas de cada unidad de producción. Se comprobó que el éxito del modelo depende tanto de la aplicación completa y constante del plan de manejo agronómico integral sostenible, como de la participación de los productores en el proceso. Los resultados validan la hipótesis planteada, al mostrar que es posible convivir con el HLB a través de estrategias sostenibles que fortalecen la resiliencia del sistema productivo.

Metodológicamente, el uso de parcelas demostrativas y el enfoque colaborativo entre técnicos y productores no solo ha permitido la transferencia efectiva de tecnología, sino también la generación de conocimiento situado. Esta propuesta impulsa un cambio de paradigma: de la simple prescripción técnica a la co-construcción de soluciones adaptadas y sostenibles.

Fin de la versión en español

- Li J, Li L., Pang Z., Kolbasov V. G., Ehsani R., & Carter E. W, N. (2019). Desarrollo de estrategias de manejo del huanglongbing de cítricos (HLB) basadas en la gravedad de los síntomas en las regiones productoras de cítricos endémicos de HLB. *Fitopatología*. Abril de 2019; 109(4):582-

592. doi:10.1094/PHYTO-08-18-0287-R. Epub 5 de marzo de 2019. PMID: 30418089.
- Millán-Martínez, J. E., Almaguer-Vargas, G., Colinas-León, M. T. B., Carvajal-Salazar, V. A., & Márquez-Berber, S. R. (2025). *Diaphorina citri* en naranjos con tres tipos de manejo del suelo en Veracruz, México. En prensa.
- Mora Aguilera, G., Robles García, P., López-Arroyo, J. I., Flores Sánchez, J., Acevedo Sánchez, G., Domínguez Monge, S., Gutierrez Espinosa, A., Loeza Kuk, E., & González Gómez, R. (2014). Situación Actual y Perspectivas del Manejo del Huanglongbing de los Cítricos. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 32(2), 108-119. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-33092014000200108&lng=es&tlng=es.
- Pineda Cagua, B. G., Hernández Mendoza, J. L., Hernández Delgado, S. J., Gill Langerica, H. R., García Olivares, J. G., De La Rosa Reyna, X. F., & Quiroz Velásquez, J. D' C. (2024). El impacto de Huanglongbing, HLB, en la producción mundial de cítricos. *Revista Boliviana de Química*, 41(1), 49-58. Epub 00 de abril de 2024. <https://doi.org/10.34098/2078-3949.41.1.5>
- Pérez Zarate, L. A., Osorio Acosta, F., Ortega Arenas, L. D., Martínez Hernández, A., & Villanueva Jiménez, J. A. (2024). Huanglongbing (HLB) de los Cítricos: Impacto Económico y Variabilidad Genética del Patógeno en México. *Agro Divulgación*.
- Rendón Medel, R., Roldán Suárez, E., Cruz Castillo, J. G., & Díaz José, J. (2016). Criterios para la identificación de módulos demostrativos. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 7(spe15), 2939-2948. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342016001102939&lng=es&tlng=es.
- Robles González, M. M., Orozco Santos, M., Manzanilla Ramírez, M. A., Velázquez Monreal, J. J., & Carrillo-Medrano, S. H. (2017). Efecto del HLB sobre el rendimiento de limón mexicano en Colima, México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 8(5), 1101-1111. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i5.111>
- Rouse, R. E., Ozores-Hampton, M., Roka, F. M., & Roberts, P. (2017). Rehabilitación de árboles de cítricos afectados por Huanglongbing mediante podas severas y tratamientos nutricionales foliares mejorados. *HortScience*, 52(7), 972–978. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI11105-16>
- SIAP (2024). Panorama Agroalimentario 2018-2024. Agricultura. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Edición 2024. Panorama-Agroalimentario-2024 Finish
- Torres-González, C. J., Almaguer-Vargas, G., Álvarez-Sánchez, M. E., Nieto-Ángel, R., & Carvajal-Salazar, V. A. (2025). Manejo de naranjo en condiciones de sequía y síntomas de Huanglongbing. En prensa.
- Trigo, E., & Elverdin, P. (2019). Los sistemas de investigación y transferencia de tecnología agropecuaria de América Latina y el Caribe en el marco de los nuevos escenarios de ciencia y tecnología. Documento N° 19. 2030 – Alimentación, agricultura y desarrollo rural en América Latina y el Caribe. Santiago de Chile: FAO. <https://www.fao.org/family-farming/detail/es/c/1235561>
- Wang, H., Mulgaonkar, N., Mallawarachchi, S., Ramasamy, M., Padilla C. S., Irigoyen, S., Coaker G., Mandadi K. K., & Fernando S. (2022). Evaluación de la inhibición de la bomba de eflujo de *Candidatus Liberibacter Asiaticus* por péptidos antimicrobianos. *Moléculas*. 27(24):8729. doi: 10.3390/moléculas27248729. PMID: 36557860; PMCID: PMC978270.