



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**CENTRO DE INVESTIGACIONES ECONÓMICAS, SOCIALES
Y TECNOLÓGICAS DE LA AGROINDUSTRIA Y LA
AGRICULTURA MUNDIAL**

CULTIVO VERTICAL DE MAÍZ ENANO PARA LA OPTIMIZACIÓN Y EFICIENCIA DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA URBANA

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN ESTRATEGIA AGROEMPRESARIAL

PRESENTA

JORGE LUIS LÓPEZ GARCÍA

BAJO LA SUPERVISIÓN DE:

DR. ROMEL OLIVARES GUTIÉRREZ



Chapingo, Estado de México, octubre de 2026



**CULTIVO VERTICAL DE MAÍZ ENANO PARA LA
OPTIMIZACIÓN Y EFICIENCIA DE PRODUCCIÓN
AGRÍCOLA URBANA**

Tesis realizada por **Jorge Luis López García**, bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN ESTRATEGIA AGROEMPRESARIAL

DIRECTOR:



DR. ROMEL OLIVARES GUTIÉRREZ

ASESOR:



DR. ROBERTO RENDÓN MEDEL

ASESOR:



M.C. RAFAEL NOCHEBUENA MOLINA

DEDICATORIAS

Dedico esta tesis a Dios, por el don de la vida, por la fortaleza brindada y por permitirme culminar satisfactoriamente esta etapa académica.

A mi familia, especialmente a mis padres, Ilda García y Luis López, por cada sacrificio realizado y por ser el fundamento de mi formación personal y profesional. Todo lo que he logrado hasta hoy es reflejo de sus enseñanzas, esfuerzo y ejemplo de vida. A mi hermano, Luis Ángel, por su apoyo constante en momentos difíciles y por su colaboración en la realización de las entrevistas de esta tesis.

A mis maestros, por compartir generosamente sus conocimientos y despertar en mí el deseo permanente de aprender.

A mis amigos y compañeros, por su compañía, consejos y ánimo, que hicieron más llevadero cada desafío a lo largo de este proceso.

A mi sentido del deber, inspirado en el pensamiento de Immanuel Kant, que me recordó la importancia de cumplir con aquello que la razón y la conciencia dictan.

Finalmente, me dedico este logro a mí mismo, por la constancia, disciplina y fortaleza para seguir adelante incluso en momentos de cansancio e incertidumbre, demostrando que con perseverancia y esfuerzo es posible alcanzar cualquier meta.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de este trabajo de investigación, el cual representa no solo un logro académico, sino también un proceso significativo de crecimiento personal.

En primer lugar, expreso mi sincero agradecimiento a mi director de tesis, Dr. Romel Olivares Gutiérrez, por su paciencia, dedicación y valiosa orientación durante todo el proceso. Asimismo, agradezco al Dr. Roberto Rendón Medel por brindarme perspectivas innovadoras, especialmente en temas como la teoría de los lazos débiles y las relaciones humanas, y al M.C. Rafael Nochebuena Molina por sus observaciones precisas, fundamentales para la conclusión de esta investigación.

Agradezco a la SECIHTI por el apoyo otorgado durante el posgrado, así como a la comunidad del CIESTAAM, que contribuyó a mi formación en un entorno de aprendizaje, disciplina y colaboración. De manera especial, agradezco al Dr. Jorge Aguilar Ávila por sus enseñanzas y consejos de vida; al Dr. Enrique Genaro Martínez González por su acompañamiento y precisión; al Dr. Vinicio Horacio Santoyo por ampliar mi visión económica del mundo; al Dr. Marrubio Muñoz Rodríguez por fortalecer mi pensamiento crítico y capacidad argumentativa; y al M.C. Juan Morales Parada por su apoyo en el desarrollo experimental.

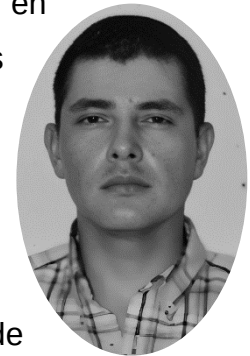
Extiendo mi reconocimiento a todos los docentes y al personal administrativo por su constante disposición y amabilidad, especialmente a José Edmundo Silva Venegas, Griselda Judith Montiel y Beatriz Nava Moreno.

Agradezco también a los grandes pensadores cuyas ideas influyeron en mi formación, entre ellos Immanuel Kant, René Girard, Carl Jung, Dale Carnegie, Brian Tracy, Karl Marx, Georgina López Ríos, Frank Suárez, Edwin J. Purcell, Aurelio Baldor y Hermann Hesse.

Finalmente, agradezco a mis colegas y compañeros, especialmente a Rafael Nochebuena Molina y Melissa Benítez Ávila, por su apoyo constante, consejos y contribuciones a mi desarrollo académico y personal.

DATOS BIOGRÁFICOS

Jorge Luis López García nació el 13 de septiembre de 1995 en Piedras Negras, Coahuila, México. Es Ingeniero en Sistemas Computacionales por el Instituto Tecnológico de Piedras Negras (ITPN) e Ingeniero Agrónomo en Horticultura Protegida por la Universidad Autónoma Chapingo (UACH).



En 2024 inició sus estudios en el Programa de Maestría en Ciencias en Estrategia Agroempresarial, adscrito al Centro de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y la Agricultura Mundial (CIESTAAM) de la Universidad Autónoma Chapingo, en el Estado de México, México.

Su formación interdisciplinaria, que integra conocimientos de ingeniería, tecnologías de la información y ciencias agronómicas, se ha orientado al estudio y análisis de temas relacionados con el sector agroalimentario y la estrategia agroempresarial.

Sus aportaciones al conocimiento han sido presentadas en el XIV Congreso Internacional y XXVIII Congreso Nacional de Ciencias Agronómicas, realizado en la Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México, México.

RESUMEN GENERAL

CULTIVO VERTICAL DE MAÍZ ENANO PARA LA OPTIMIZACIÓN Y EFICIENCIA DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA URBANA ¹

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental de un sistema de agricultura vertical enfocado al cultivo de maíz enano *braquítico* como una alternativa factible para aumentar la producción nacional de maíz amarillo en México. El estudio se sustentó en la problemática de la dependencia de importaciones, el efecto del cambio climático, la baja productividad agrícola y limitaciones en los sistemas tradicionales de producción. Se adoptó un enfoque metodológico mixto mediante la integración de investigación cuantitativa experimental y, En primer lugar, se realizó un experimento que consistió en el diseño y construcción de un prototipo de cultivo vertical, utilizando una estructura de policloruro de vinilo (PVC), iluminación LED, sistema hidropónico con recirculación de solución nutritiva y monitoreo de variables climáticas. En segundo lugar, se llevaron a cabo entrevistas a productores y actores relacionados con el sector agrícola con el fin de identificar la viabilidad y adaptabilidad del sistema. Los hallazgos indicaron que la agricultura vertical presentó ventajas relacionadas a un uso mucho más eficiente del espacio, disminución recursos hídricos y la posibilidad de incrementar la productividad mediante sistemas controlados. Asimismo, se identificaron limitaciones en el consumo energético, así como la inversión inicial requerida y una mano de obra especializada. Se concluyó que al implementar sistemas verticales para la producción de maíz enano *braquítico* son una opción factible capaz de contribuir al desarrollo de sistemas agrícolas más sostenibles. Sin embargo, su adopción requiere una inversión inicial alta y una adaptación a condiciones locales.

Palabras clave: sostenibilidad, hidroponía, producción agrícola, cambio climático, seguridad alimentaria.

¹Tesis de Maestría en Ciencias en Estrategia Agroempresarial, Centro de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y la Agricultura Mundial (CIESTAAM), Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Jorge Luis López García

Director de tesis: Dr. Romel Olivares Gutiérrez

ABSTRACT
**VERTICAL FARMING OF DWARF MAIZE FOR OPTIMIZING THE EFFICIENCY OF
URBAN AGRICULTURAL PRODUCTION¹**

This study aimed to evaluate the technical, economic, and environmental feasibility of a vertical farming system for the cultivation of brachytic dwarf maize as an alternative for strengthening domestic yellow maize production in Mexico. The study addressed issues related to import dependence, the effects of climate change, low agricultural productivity, and the limitations associated with traditional production systems. A mixed-methods approach was adopted, integrating quantitative experimental research with qualitative analysis. First, a vertical farming prototype was designed and constructed using a polyvinyl chloride (PVC) structure, LED lighting, a hydroponic system with recirculating nutrient solution, and monitoring of microclimatic variables.

Second, interviews were conducted with producers and other participants in the agricultural sector to assess their perceptions of the system's viability and adaptability.

The findings indicated that vertical farming offers potential advantages, including more efficient use of space, reduced water consumption, and increased productivity through controlled growing conditions. Furthermore, limitations related to energy consumption, high initial investment costs, and the need for specialized labor were identified. The implementation of vertical farming systems for brachytic dwarf maize demonstrated potential as a sustainable and resilient agricultural alternative. However, further studies are needed to evaluate its scalability and economic feasibility.

Keywords: sustainability, hydroponics, agricultural production, climate change, food security.

¹Master's Thesis in Science in Agribusiness Strategy,
Center for Economic, Social, and Technological Research on Agribusiness and World
Agriculture (CIESTAAM),
Autonomous University of Chapingo
Author: Jorge Luis López García
Thesis Advisor: Dr. Romel Olivares Gutiérrez

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Introducción General	1
1.2. Antecedentes.....	2
1.3. El problema de investigación.....	4
1.4. Objetivo general	4
1.5. Preguntas de investigación.....	5
1.6. Hipótesis de investigación	6
1.7. Justificación	6
1.8. Acerca de la estructura.....	9
2. REVISIÓN DE LITERATURA	12
2.1. Marco innovación disruptiva	12
2.2. Convergencia tecnológica y el futuro de la agricultura	13
2.3. La agricultura vertical.....	15
2.3.1. Maíz Enano, Morfología y Estructura	15
2.4. Políticas y Estrategias para el Desarrollo Sostenible	17
2.5. Contexto Nacional: Agricultura Vertical en México	17
2.6. Relevancia del Cambio Climático	18
2.7. Contexto nacional e internacional del maíz amarillo.....	20
2.8. Problemáticas actuales de la producción en México	22
2.9. Actores clave involucrados	24

2.10.	Externalidades positivas y negativas del cultivo vertical de maíz ...	26
2.10.1.	Externalidades positivas	26
2.10.2.	Externalidades negativas.....	28
2.11.	Relaciones conceptuales	30
3.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	31
3.1.	Experimento del prototipo	31
3.1.1.	Materiales y métodos	32
3.1.2	Descripción del experimento	35
3.2.	Análisis de costos.....	42
3.2.1.	Consideraciones del análisis de costos.....	45
3.3.	Entrevistas con productores y técnicos	46
3.3.1.	Selección del perfil de los entrevistados.....	47
3.3.2.	Instrumento y modalidad de recolección	47
3.3.3.	Consideraciones éticas y consentimiento informado.....	48
3.4.	Procedimiento de análisis y triangulación	48
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	50
4.1.	Resultados de la optimización de la producción y reducción del impacto ambiental (pregunta 1).....	50
4.1.2	Descripción del experimento y parámetros medidos	51
4.1.3	Rendimiento y productividad comparativa	54
4.1.4	Eficiencia en uso de agua, espacio y energía	56
4.1.5	Mejoras con base en las lecciones aprendidas	57

4.2.	Resultados de la pregunta 2: Ventajas para la mitigación de la degradación del suelo y eficiencia de recursos	62
4.2.1.	Evaluación de sostenibilidad del sistema vertical	62
4.2.2.	Comparación de costos y eficiencia hídrica	63
4.2.3.	Beneficios ambientales.....	65
4.3.	Resultados de la pregunta 3: Políticas públicas e innovaciones tecnológicas necesarias en México	68
4.3.1.	Análisis de entrevistas a productores y expertos	68
4.3.2.	Identificación de barreras y facilitadores	72
4.3.3.	Propuestas de política pública y modelo de adopción tecnológica 73	
4.3.4.	Conclusiones generales del capítulo	74
5.	CONCLUSIONES	76
5.1.	Aplicaciones económicas y sociales.....	76
5.2.	Limitaciones del estudio	77
5.3.	Recomendaciones para futuras investigaciones	80
6.	LITERATURA CITADA	81

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Solución nutritiva del experimento.	33
Cuadro 2. cuadro de costos ejemplificativos de maíz.	43
Cuadro 3. Indicadores de rendimiento comparativo entre maíz convencional y vertical.	56
Cuadro 4. Productividad de grano ajustada por recursos.	56
Cuadro 5. Costos de producción de maíz vertical.....	65
Cuadro 6. Indicadores comparativos clave entre el cultivo vertical hidropónico y el cultivo convencional.	66
Cuadro 7. Comparación del consumo de agua y eficiencia energética del cultivo	67

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura capitular de la tesis.....	11
Figura 2. Principales actores.....	26
Figura 3. Principales conceptos de agricultura vertical.	30
Figura 4. Temperaturas promedio de Texcoco de mora, Estado de México, México.	34
Figura 5. Sistemas verticales en estados iniciales.	35
Figura 6. Sistema subterráneo de sistemas verticales.....	36
Figura 7. Plantas en v3 (3 hojas desarrolladas).....	37
Figura 8. Imagen de deficiencia de magnesio en las puntas de las hojas.	38
Figura 9. Fotografías de plántulas del experimento B y C.	39
Figura 10. Experimento A con problemas de virus y hongos.....	40
Figura 11. Deficiencia de magnesio en Experimento C.	41
Figura 12. Tendencia de costos de producción de maíz en México (2016–2022).	44
Figura 13. Diagrama de triangulación metodológica.....	49
Figura 14. Sistema vertical de maíz en estado preliminar.	55
Figura 15. Almacigo de plántulas.....	58
Figura 16. Sistema de redundancia hídrica.	59
Figura 17. Sistema principal con doble línea de riego.	60
Figura 18. Cámara time lapse apuntada a los sistemas verticales.	61
Figura 19. Comparativa de recursos por kg de maíz.	64
Figura 20. Análisis de ponderación de pesos de encuesta número 1.....	68
Figura 21. Análisis de ponderación de pesos de encuesta número 2.....	70
Figura 22. Análisis de ponderación de pesos de encuesta número 3.....	71
Figura 23. Niveles de impactos por barrera.	73
Figura 24. Línea de innovación propuesta.....	74

1. INTRODUCCIÓN

1.1.Introducción General

El planeta enfrenta una crisis ambiental sin precedentes, caracterizada por la escasez de recursos naturales y la degradación de los ecosistemas. Este problema se debe, en gran medida, al agotamiento de los recursos causado por prácticas agrícolas insostenibles, como la agricultura extensiva. La solución radica en enfocarse en producir más en menos espacio, a través de sistemas de producción más eficientes, y no en producir de manera extensiva, expandiendo la frontera agrícola (Foley et al., 2011) .

Frente a esta crisis, es imperativo transitar hacia sistemas agrícolas no extractivos. La agricultura intensiva, como el cultivo en invernaderos, ofrece ventajas, como la optimización del uso del agua y la posibilidad de aumentar la precocidad y prolificidad de los cultivos (Godfray, Beddington, Crute, Haddad, Lawrence, Muir, & ... Toulmin, 2010) . Tal como pudiera ser el cultivo de tomate en invernadero, que inicialmente no era más eficiente que el cultivo extensivo, ha demostrado una mejora sustancial en la productividad con el tiempo (Touliatos et al., 2016) .

Otra ventaja es la larga vida de anaquel de los cultivos en invernadero, como el maíz, que reduce las pérdidas postcosecha y mejora la rentabilidad. Finalmente, estos sistemas promueven la sostenibilidad al reducir la presión sobre los ecosistemas naturales, conservando bosques y selvas esenciales para la biodiversidad(Rockström, Steffen, Noone, Persson, Chapin III, et al., 2009) .

Este mismo principio puede aplicarse al maíz, donde la precocidad permitiría hasta tres ciclos de cultivo al año, aumentando significativamente la producción por unidad de área(Peña-Reyes, 2016) .

1.2. Antecedentes

La agricultura vertical en invernaderos surge como una solución innovadora y sostenible, permitiendo maximizar la productividad en espacios reducidos y optimizando el uso de recursos como agua y nutrientes (Despommier, 2010). Este enfoque reduce la presión sobre tierras cultivables y ecosistemas naturales, a la vez que también contribuye a la regeneración de bosques y selvas, esenciales para la biodiversidad (Tilman et al., 2017). La relevancia de este tema radica en su potencial para transformar la agricultura tradicional en un sistema más eficiente y resiliente, garantizando la seguridad alimentaria y la sostenibilidad ambiental en un contexto de creciente demanda y escasez de recursos (Kalantari, Mohd Tahir, et al., 2017).

Una de las transformaciones tecnológicas más significativas de las últimas décadas ha sido la introducción y evolución de sistemas de cultivo protegido y controlado, conocidos genéricamente como agricultura bajo cubierta (Rockström, Steffen, Noone, Persson, Å., et al., 2009). Estas técnicas permiten modificar las condiciones ambientales para optimizar los parámetros fisiológicos de los cultivos, logrando incrementos sustanciales en rendimiento, calidad y eficiencia en el uso de recursos como agua y suelo (Booth et al., 2016).

No obstante, el crecimiento demográfico y la expansión urbana han generado una presión creciente y latente sobre los suelos agrícolas tradicionales, reduciendo su disponibilidad y encareciendo su acceso (A. García et al., 2020).

Ante este escenario, la agricultura urbana emerge como una alternativa viable para garantizar la seguridad alimentaria, reducir la huella ecológica y acercar la producción de alimentos a los centros de consumo (J. Zepeda, 2017a). Dentro de este marco, el cultivo vertical se presenta como una innovación disruptiva que maximiza el uso del espacio mediante la disposición de plantas en estratos superpuestos (Beacham et al., 2019). Esta técnica es particularmente relevante en entornos urbanos, donde el espacio horizontal es limitado y costoso (Kalantari, Mohd Tahir, et al., 2017).

El maíz enano (*Zea mays* L.), por su parte, representa una variedad mejorada genéticamente para reducir su altura y ciclo de crecimiento, manteniendo altos rendimientos por planta. Su adaptabilidad a condiciones de cultivo controlado y su porte reducido lo convierten en un candidato ideal para sistemas de agricultura vertical.

La conjunción de estas tecnologías de cultivo vertical, agricultura protegida y variedades enanas tiene el potencial de revolucionar la producción agrícola en contextos urbanos y periurbanos, además de ser una respuesta concreta a los desafíos de la sostenibilidad alimentaria en el siglo XXI (Li et al., 2024) .

Sin embargo, la adopción de estas innovaciones no depende únicamente del factor tecnológico. Es necesaria una articulación virtuosa con otros elementos como el financiamiento, la asistencia técnica especializada, el acceso a mercados locales y la capacitación de los productores. Además, se requiere evaluar la escala mínima viable de estas unidades de producción para garantizar su rentabilidad y sostenibilidad económica (J. Zepeda, 2017).

En este contexto, la presente investigación se propone analizar la factibilidad técnica y económica del cultivo vertical de maíz enano como modelo de optimización y eficiencia productiva en entornos urbanos, tomando como referencia experiencias previas en agricultura protegida y lecciones aprendidas de casos exitosos a nivel internacional.

1.3.El problema de investigación

La agricultura extensiva ha agotado los recursos naturales, causando deforestación, pérdida de biodiversidad y degradación del suelo, lo que limita la disponibilidad de tierras cultivables (Tilman et al., 2017). Este problema se agrava por el cambio climático, que afecta los patrones de lluvia y la productividad agrícola (C. Zepeda, 2024) . Investigar sistemas intensivos, como la agricultura vertical en invernaderos, es crucial para garantizar la sostenibilidad alimentaria y reducir el impacto ambiental.

1.4.Objetivo general

Por lo anterior, el objetivo principal de esta investigación fue evaluar la viabilidad técnica del cultivo de maíz enano en sistemas de agricultura vertical dentro de invernaderos para aumentar la productividad y reducir el impacto ambiental.

Los objetivos específicos se enlistan a continuación:

- a) Determinar un prototipo adecuado para el cultivo de maíz vertical en ambientes controlados, tomando en cuenta el ahorro de recursos naturales, como rendimiento por planta, rendimiento por metro cuadrado, rendimiento por metro cubico, agua utilizada, ciclos anuales, consumo de agua por kg de grano, eficiencia energética.
- b) Analizar la factibilidad económica del prototipo propuesto contra la agricultura tradicional, tomando en cuenta los costos de producción.
- c) Analizar los costos de producción fijos del prototipo propuesto contra la agricultura tradicional para comparar la factibilidad económica entre estos.
- d) Evaluar la eficiencia en el uso de recursos hídricos dentro del sistema de cultivo vertical propuesto, considerando el consumo de agua y las innovaciones tecnológicas aplicables, así como su posible integración en

estrategias y políticas públicas orientadas a fortalecer la seguridad alimentaria y disminuir la presión sobre los ecosistemas en México.

1.5. Preguntas de investigación

¿Cómo puede la agricultura protegida en sistemas verticales optimizar la producción de maíz amarillo enano en México, maximizando la productividad y reduciendo el impacto ambiental?

¿Qué ventajas ofrece la implementación de agricultura vertical para el cultivo de gramíneas, específicamente el maíz, en términos de ahorro económico de costos de producción?

¿Qué recomendaciones con relación a políticas públicas e innovaciones tecnológicas serían necesarias para promover el uso de sistemas de agricultura protegida y vertical en México, fortaleciendo la seguridad alimentaria y reduciendo la presión sobre los ecosistemas?

1.6. Hipótesis de investigación

H1: La agricultura protegida en sistemas verticales incrementa significativamente la productividad del maíz amarillo enano, logrando un mayor rendimiento por metro cúbico en comparación con los sistemas de cultivo convencional.

H2: La implementación del prototipo de agricultura vertical para el cultivo de maíz enano puede resultar económicamente viable frente a la agricultura tradicional, al reducir costos de producción mediante un uso más eficiente del espacio y otros recursos dentro de ambientes controlados.

H3: La adopción de innovaciones tecnológicas y el fortalecimiento de políticas públicas orientadas a la agricultura protegida y vertical en México favorecerán sistemas de producción más sostenibles, fortaleciendo la seguridad alimentaria y reduciendo la presión sobre los ecosistemas ante el crecimiento poblacional.

1.7. Justificación

La problemática ambiental y alimentaria, además de la escasez de recursos naturales y la creciente variabilidad climática, son factores que comprometen la capacidad de los sistemas agrarios convencionales para satisfacer la demanda alimentaria futura. La agricultura extensiva está comprobada como ser una de las causas principales de deforestación, pérdida de la biodiversidad a nivel mundial y deterioro completo del suelo; por ello resulta como una ordenanza exhaustiva el explorar alternativas productivas que permitan aumentar la producción sin expandir la frontera agrícola y que al mismo tiempo se tenga la propiedad de reducir la huella ecológica de la agricultura (Tilman et al., 2017).

Adoptar y adaptar sistemas de agricultura protegida y vertical para cultivos como el maíz amarillo enano responde de forma directa a esa necesidad: estos sistemas permiten controlar diversas variables ambientales, mejorar la eficiencia en el uso del agua y de nutrientes, acortar ciclos productivos y aumentar el rendimiento por unidad de superficie (Godfray, Beddington, Crute, Haddad,

Lawrence, Muir, & Toulmin, 2010). El maíz enano, por su porte reducido y su potencial de adaptación a ambientes controlados, constituye un sujeto de estudio idóneo para evaluar la factibilidad de trasladar técnicas de cultivo protegido y vertical a gramíneas de alto consumo regional.

Desde un punto de vista económico y de sostenibilidad, aunque los costos iniciales de los sistemas intensivos suelen ser mayores que los de la agricultura extensiva, la relación costo beneficio a mediano y largo plazo mejora notablemente cuando se incorporan ahorros por menor uso de insumos hídricos, reducción de pérdidas postcosecha, aumento de la productividad por metro cuadrado y estabilidad productiva frente a eventos climáticos extremos (See, 2024). Además, del poder introducir el concepto de metros cúbicos, dejando atrás la antigua forma de medición de metros cuadrados.

La dimensión ambiental es crítica, la expansión de la agricultura intensiva y extensiva ha sido asociada a una pérdida significativa de biodiversidad y extinciones locales de especies. Esta investigación justifica la necesidad de cuantificar y comparar no solo la productividad sino también el uso de recursos ambientales eficientes, de modo que las recomendaciones resultantes privilegien soluciones que minimicen el costo de recursos hídricos incluso si implican mayor inversión inicial (Specht, 2014).

México enfrenta retos de seguridad alimentaria y pérdida de superficie agrícola productiva, así como desigualdad en el acceso a tecnologías. Evaluar la viabilidad técnica, económica y normativa del cultivo vertical de maíz en entornos protegidos proveerá evidencia útil para diseñadores de políticas públicas, programas de financiamiento y proyectos de extensión agraria que promuevan prácticas sostenibles, lo que hace a esta investigación pertinente para tomadores de decisión y actores locales.

Metodológicamente, la investigación propuso una estrategia integral que articule diseño y construcción de prototipo, experimentación comparativa (rendimiento, ciclos por año, uso de agua, calidad de grano), recolección de evidencia

cualitativa (entrevistas a productores y actores clave sobre adopción tecnológica) y análisis económico (SAGARPA, 2023) .

En términos de aportes, la tesis contribuyó a:

1. Proveer evidencia sobre la factibilidad técnica del cultivo vertical de maíz enano en invernadero (rendimiento por metro cuadrado, número de ciclos posibles, calidad).
2. Cuantificar comparativamente la eficiencia en el uso del agua y otros recursos frente a sistemas convencionales.
3. Evaluar la viabilidad económica a diferentes escalas y proponer modelos de negocio y políticas públicas que faciliten la adopción.
4. Entregar recomendaciones prácticas y metodológicas para futuros proyectos de agricultura urbana y periurbana.

Finalmente, la investigación es pertinente por su carácter innovador y su potencial impacto multidimensional: ambiental (reducción de presión sobre ecosistemas), productivo (mayor rendimiento en menos superficie), social (oportunidades en entornos urbanos) y político (información para diseñar incentivos y regulaciones). Por todo ello, resulta justificable y necesario investigar la viabilidad del cultivo de maíz en sistemas de agricultura vertical dentro de invernaderos, con un enfoque interdisciplinario que integre prototipo experimental, análisis económico ambiental y entrevistas de actores para garantizar que los resultados sean técnicos, aplicables y socialmente relevantes.

1.8. Acerca de la estructura

La presente tesis se organiza en seis capítulos mostrados en números arábigos, estructurados de forma progresiva y lógica para dar respuesta a las preguntas de investigación y cumplir con los objetivos planteados. Cada capítulo cumple una función específica dentro del desarrollo del trabajo, desde la contextualización inicial del problema hasta la formulación de conclusiones y recomendaciones finales (Figura 1).

Esta secuencia capitular integra enfoques cuantitativos y cualitativos mediante una estrategia metodológica mixta, articulando un diseño experimental con la recolección de datos cualitativos a través de entrevistas a productores. De este modo, la construcción global del documento facilita la triangulación de hallazgos empíricos con el marco teórico y referencial, asegurando que los resultados obtenidos se interpreten de manera integral y se traduzcan en propuestas concretas para la producción agrícola sostenible y el diseño de políticas públicas pertinentes.

El Capítulo 1 expone el planteamiento del problema, los objetivos generales y específicos, las preguntas de investigación e hipótesis, así como la justificación del estudio. En esta primera sección se describe el contexto de la agricultura urbana y la necesidad de optimizar la producción de maíz enano en sistemas verticales. Aquí se fundamenta por qué es relevante investigar el cultivo vertical de maíz enano para la optimización y eficiencia productiva, estableciendo las bases del problema a abordar.

El Capítulo 2 la revisión de literatura y referencial que sustenta los materiales y métodos. En este apartado se revisa la literatura relevante sobre agricultura intensiva y vertical, incluyendo conceptos clave y estudios previos sobre sistemas de cultivo vertical, variedades de maíz enano, sostenibilidad agrícola y experiencias de agricultura urbana. También se abordan los fundamentos teóricos relacionados con la innovación tecnológica en el sector agroalimentario y las políticas públicas vinculadas al desarrollo agrícola sostenible.

El Capítulo 3, materiales y métodos, describe detalladamente la estrategia metodológica mixta empleada en la investigación. Se justifica y explica la combinación de métodos cuantitativos y cualitativos utilizada para abordar de manera integral las preguntas de investigación. En primer lugar, el capítulo presenta el diseño experimental desarrollado para evaluar la viabilidad técnica y eficiencia del cultivo vertical de maíz enano; esto incluye la descripción del prototipo o sistema de cultivo vertical implementado, las variables medidas y los procedimientos de recolección y análisis de datos cuantitativos.

En segundo lugar, se detalla la componente cualitativa de la metodología, basada en entrevistas semiestructuradas a productores y otros actores relevantes. Se explica cómo fueron seleccionados los informantes, los temas explorados en las entrevistas y el procedimiento de análisis de los datos cualitativos. Al articular estos dos enfoques, el capítulo metodológico demuestra cómo la investigación integra las perspectivas experimental y social para obtener una visión más completa del fenómeno estudiado.

El Capítulo 4, Resultados y discusión, presenta de forma organizada los hallazgos empíricos de la investigación, abarcando tanto los resultados cuantitativos del experimento como los resultados cualitativos de las entrevistas. En la primera parte del capítulo, se exponen los resultados experimentales obtenidos del cultivo vertical de maíz enano en condiciones controladas. Se reportan métricas de productividad, eficiencia en el uso de recursos y otros indicadores clave de sostenibilidad y rendimiento. Estos datos cuantitativos permiten evaluar en qué medida el sistema de cultivo vertical propuesto logra optimizar la producción agrícola urbana, respondiendo directamente a varias de las preguntas de investigación e hipótesis planteadas.

Finalmente, el Capítulo 5, Conclusiones, ofrece un análisis crítico e integrador de los hallazgos, estableciendo conexiones sólidas entre los resultados obtenidos. Aquí se triangulan los resultados cuantitativos y cualitativos con las teorías y estudios expuestos en el Capítulo 2 y 3, examinando cómo los hallazgos apoyan, amplían o contrastan la literatura existente.

Esta discusión permite validar las hipótesis de investigación, explicando en qué medida los resultados experimentales y las evidencias de campo responden a las preguntas planteadas al inicio. Asimismo, se abordan las implicaciones prácticas de los resultados. En resumen, la estructura capitular de la tesis refleja una coherencia interna sólida: cada capítulo se construye sobre el anterior y aporta elementos clave para resolver el problema de investigación.

Desde la Introducción que enmarca la pregunta principal de investigación a la fundamentación teórica que brinda las herramientas conceptuales, la Metodología que explica el enfoque mixto adoptado y los resultados que proveen evidencia empírica, hasta llegar a la discusión y conclusiones donde todo se integra, la tesis avanza de lo general a lo específico y retorna a lo general con propuestas concretas, por lo que esta progresión lógica asegura que los objetivos de investigación se aborden sucesivamente y que al final del documento se haya dado respuesta fundamentada a la cuestión central planteada al inicio.

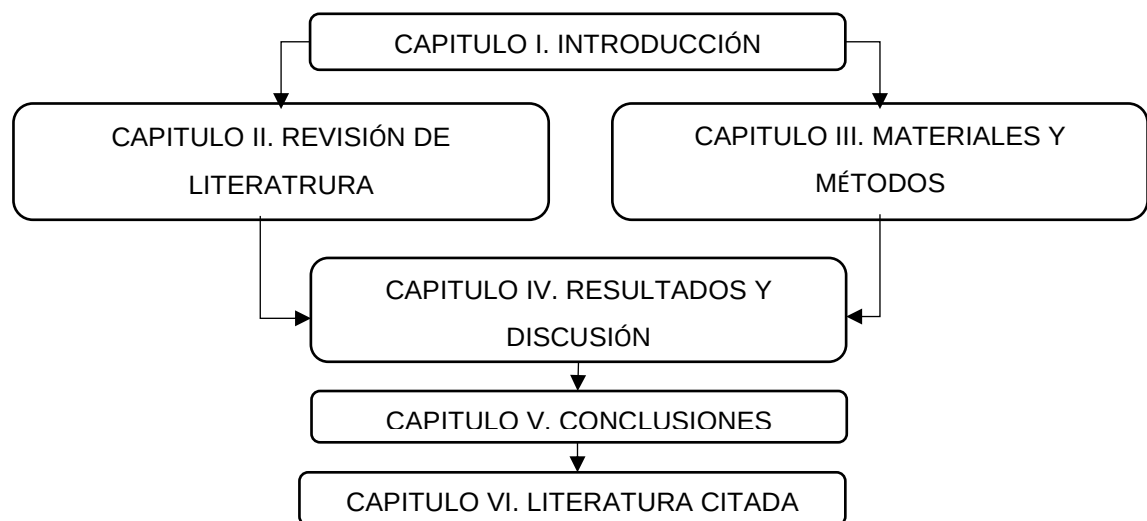


Figura 1. Estructura capitular de la tesis.

Fuente: Elaboración propia.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1.Marco innovación disruptiva

La innovación disruptiva se entiende como el proceso por el cual una empresa o tecnología, con menos recursos al inicio, logra desafiar a incumbentes existentes entrando por segmentos desatendidos o creando por completo nuevos mercados, para luego escalar y desplazar a los actores tradicionales(F. García et al., 2021) .

Aplicado a la agricultura, la innovación disruptiva no solo es tecnológica, sino sistémica, la cual implica cambios en la forma de producir (metros cúbicos contra metros cuadrados), en la logística (proximidad al mercado), en la gobernanza (políticas públicas y marcos regulatorios) y en la economía de la producción (modelos de negocio, financiamiento y servicios)(Tilman et al., 2017) .

La noción de innovación disruptiva provee un marco útil para analizar al cultivo vertical de maíz enano como una alternativa capaz de reconfigurar la producción agrícola en contextos urbanos y periurbanos. El enfoque obliga a estudiar no solo la tecnología y el rendimiento, sino las condiciones de adopción, modelos de negocio, políticas públicas y los efectos ambientales y sociales acumulados(Al-Chalabi, 2015) .

2.2. Convergencia tecnológica y el futuro de la agricultura

La convergencia tecnológica se refiere a la integración sinérgica de diversas disciplinas y herramientas tales como la biotecnología, la electrónica, la informática, la robótica y las energías renovables para crear sistemas productivos más inteligentes, eficientes y resilientes (Diamandis & Kotler, 2021) . En el ámbito agroalimentario esta convergencia no sólo implica la adopción aislada de tecnologías, sino la articulación de éstas en plataformas que permiten monitoreo continuo, toma de decisiones automatizada y retroalimentación en tiempo real. Así, la agricultura del futuro se concibe como un ecosistema digitalizado y modular, capaz de optimizar recursos, predecir riesgos y adaptar prácticas productivas a condiciones variables, lo que abre posibilidades de transformación profunda respecto a los modelos tradicionales de producción.

Entre las tecnologías que lideran esta convergencia destacan la agricultura de precisión basada en sensores e Internet de las Cosas (IoT), el uso de algoritmos de inteligencia artificial para análisis de datos y predicción, la automatización y la robótica para labores repetitivas o de alta precisión, y la mejora genética dirigida de cultivos mediante técnicas modernas. La iluminación y control ambiental en invernaderos, los sistemas hidropónicos y aeropónicos, y las soluciones de fertirrigación automatizada conforman el conjunto físico de la convergencia, mientras que plataformas de gestión, gemelos digitales y modelos predictivos constituyen la capa de software que maximiza la eficiencia operativa y la toma de decisiones basada en evidencia (Khanal et al., 2020) .

La agricultura vertical, y en particular el cultivo de maíz enano en ambientes protegidos, constituye un escenario paradigmático donde la convergencia tecnológica muestra su mayor potencial. Al combinar variedades de ciclo corto y porte reducido con control ambiental estratificado, tiempos de riego y fertilización, es posible aumentar la productividad por volumen, reducir el consumo hídrico por kilogramo producido y disminuir pérdidas postcosecha. Además, la integración de la automatización en la siembra, polinización asistida y recolección permite escalar la operación sin incrementar proporcionalmente los costos laborales, lo

que mejora la viabilidad económica de sistemas intensivos en espacios urbanos y periurbanos(Al-Kodmany, 2018) .

No obstante, la convergencia tecnológica también plantea retos y dilemas que deben considerarse en un marco de sostenibilidad integral. En términos ambientales, la ganancia en eficiencia hídrica y en uso de suelo puede verse contrapesada por aumentos en la demanda energética si la electricidad proviene de fuentes fósiles; por ello, la incorporación de energías renovables y diseños de bajo consumo son condiciones necesarias para mantener un balance ambiental positivo. Socialmente, la automatización y el cambio de localización de la producción pueden transformar dinámicas laborales rurales y urbanas, exigir nuevas capacidades técnicas y generar brechas de acceso a tecnología entre diferentes productores; estas externalidades requieren políticas públicas y programas de formación que permitan una transición justa y equitativa.(Diamandis & Kotler, 2021)

Finalmente, la convergencia tecnológica redefine el horizonte de posibles futuros agrícolas: desde sistemas localizados y resilientes que abastecen mercados urbanos con menor huella ambiental, hasta cadenas híbridas que combinan producción vertical para productos agricultura extensiva, resulta fundamental articular los hallazgos experimentales con análisis de energía, costos y políticas públicas, de manera que las recomendaciones no se limiten a la factibilidad técnica, sino que propongan rutas concretas para la adopción escalable y sostenible.

2.3. La agricultura vertical

Implica el cultivo de plantas en capas apiladas verticalmente, aprovechando tecnología como sistemas hidropónicos y luces LED para maximizar la eficiencia del espacio y los recursos (Kozai et al., 2019). En México, estudios destacan la potencialidad de estas técnicas para superar barreras relacionadas con la falta de tierras cultivables (de Anda & Shear, 2017a), además de permitiendo una producción más controlada e independiente de las condiciones climáticas (Kalantari, Tahir, et al., 2017) . Además, reduce hasta en un 90% el uso de agua comparado con la agricultura convencional (Touliatos et al., 2016).

El alto costo inicial de implementación y la dependencia tecnológica representan barreras significativas, especialmente en países en desarrollo como México. Sin embargo, modelos adaptados a las condiciones locales pueden mitigar estos desafíos (Banerjee & Adenaeuer, 2014), no obstante, los sistemas verticales pueden producir alimentos durante todo el año, lo que contribuye directamente a mejorar la seguridad alimentaria en contextos urbanos y rurales (Specht, 2014).

2.3.1. Maíz Enano, Morfología y Estructura

El maíz enano, definido por su menor altura y un ciclo de cultivo más corto en comparación con las variedades tradicionales, resulta especialmente adecuado para sistemas de cultivo controlados y estratificados. Su porte reducido facilita la disposición en estanterías o módulos verticales, permitiendo incrementar la densidad de siembra por huella de suelo sin comprometer la manejabilidad de las plantas (Acosta, 2009). Esta mayor densidad, cuando se acompaña de un control preciso del ambiente (luz, temperatura, humedad, nutrientes), se traduce en una productividad por unidad de volumen significativamente superior a la alcanzable en cultivo a campo abierto, lo que convierte al maíz enano en una alternativa lógica para la agricultura urbana y periurbana intensiva.

Desde la perspectiva genética y de mejoramiento, el desarrollo de híbridos de maíz enano ha mostrado avances importantes para optimizar rendimiento y

adaptabilidad en espacios reducidos y condiciones adversas. Las líneas híbridas se diseñan para combinar rasgos como precocidad, eficiencia en la asignación de biomasa y resistencia a problemas de anegamiento o sequía intermitente; además, la selección por arquitectura de planta (tallo robusto, nudo bajo) contribuye a reducir el riesgo de acame en cultivos densos (Peña-Reyes, 2016). Estas características permiten que las variedades enanas mantengan o incluso mejoren la producción por planta cuando se ajustan prácticas de manejo específicas, lo que es crucial en sistemas donde la optimización del espacio y del tiempo de cultivo es un objetivo central.

Las particularidades fisiológicas del maíz enano tales como una relación hoja y tallo más eficiente, un sistema radical adaptado a contenedores y una tasa de maduración acelerada lo hacen más eficaz en el uso de recursos dentro de sistemas intensivos. En condiciones de cultivo protegido y fertirrigación automatizada, las plantas enanas pueden expresar una mayor eficiencia en la utilización del agua y de nutrientes por kilogramo de grano producido, en comparación con genotipos de ciclo largo diseñados para campo abierto. Asimismo, algunos híbridos muestran mayor tolerancia a estrés abiótico (C. Zepeda, 2024).

Sin embargo, la adaptación del maíz enano a sistemas verticales requiere ajustes agronómicos específicos. La densidad aumentada y el confinamiento del volumen radicular demandan estrategias de fertirrigación de alta precisión, manejo del microclima por capas y soluciones para la polinización (manual o asistida en ausencia de flujo de viento natural). Es importante considerar la relación entre rendimiento por planta y rendimiento por unidad de área por volumen, aunque el primero de estos pueda ser menor que en campo tradicional, la multiplicación de estratos y ciclos por año compensa esta diferencia cuando el diseño del sistema es óptimo.

2.4. Políticas y Estrategias para el Desarrollo Sostenible

La Agenda 2030 de las Naciones Unidas resalta la necesidad de innovaciones tecnológicas en la agricultura para enfrentar el cambio climático y garantizar la sostenibilidad alimentaria (Berrang-Ford et al., 2015). El cambio climático afecta directamente la producción agrícola en México. La agricultura vertical, al ser independiente de las condiciones ambientales, ofrece una solución resiliente a estos desafíos (Lipper et al., 2018). El uso de tecnologías como la inteligencia artificial y el Big data en la agricultura vertical permite optimizar los recursos y minimizar el impacto ambiental (Wolfert et al., 2017).

2.5. Contexto Nacional: Agricultura Vertical en México

México, al ser un país con una fuerte tradición agrícola, enfrenta desafíos significativos como la dependencia de importaciones de alimentos básicos, la degradación del suelo y los efectos del cambio climático (López, 2020). En este contexto, la agricultura vertical se posiciona como una alternativa prometedora para incrementar la productividad, especialmente en el cultivo de maíz amarillo, un grano esencial para la dieta animal y la economía nacional (Puyana & Romero, 2016).

El maíz enano, caracterizado por su menor altura y rápido crecimiento, presenta ventajas significativas para su integración en sistemas verticales. Este tipo de cultivo no solo permite una mayor densidad de plantación, sino que también reduce el tiempo entre cosechas, maximizando la eficiencia (Peña-Reyes, 2016).

La producción local de maíz amarillo en sistemas verticales puede disminuir la necesidad de importar hasta un 30%, fortaleciendo la autosuficiencia alimentaria (Delgado & Sánchez, 2019). Al controlar el entorno de cultivo, se reduce la vulnerabilidad frente a fenómenos como sequías y heladas (Hernández & García, 2020).

Agricultura Vertical y Sostenibilidad

La agricultura vertical tiene un impacto directo en la seguridad alimentaria al garantizar un suministro continuo de alimentos frescos y de calidad en regiones urbanas. Además, su capacidad para operar en entornos controlados reduce la dependencia de insumos externos y optimiza el uso de recursos como el agua y los nutrientes (Kalantari, Tahir, et al., 2017).

Los sistemas cerrados minimizan la contaminación del suelo y el agua al evitar el uso de pesticidas y fertilizantes tradicionales (Bongiovanni & Lowenberg-DeBoer, 2004). Al consumir menos agua y energía, la agricultura vertical contribuye a reducir la huella de carbono de los sistemas agrícolas (Wolfert et al., 2017).

Este tipo de agricultura se alinea con la Agenda 2030 de las Naciones Unidas, que promueve el desarrollo sostenible mediante el uso de tecnologías innovadoras y prácticas resilientes (Industrializado, 2023). Programas como "Producción para el Bienestar" en México podrían adaptarse para financiar proyectos de agricultura vertical, incentivando su adopción en comunidades rurales y urbanas (Instituto Nacional de Estadística y geografía, 2023).

2.6. Relevancia del Cambio Climático

El cambio climático se ha erigido como una de las principales amenazas para la agricultura convencional en México. Este fenómeno global se manifiesta a nivel local mediante una mayor frecuencia e intensidad de eventos meteorológicos extremos, como las sequías prolongadas que estrangulan la disponibilidad hídrica, las lluvias torrenciales que causan inundaciones y erosión, y las temperaturas extremas que inducen estrés térmico en los cultivos. En conjunto, estos factores han impactado negativamente la estabilidad y los rendimientos de cultivos básicos fundamentales para la seguridad alimentaria del país, como es el caso del maíz forrajero (A. García et al., 2020). La imprevisibilidad climática, por tanto, pone en riesgo no solo la productividad sino también la economía de millones de agricultores.

Frente a este desafío, la agricultura vertical emerge como una alternativa innovadora y resiliente (Birkby, 2016). Al operar en entornos controlados dentro de invernaderos o estructuras en interiores, esta tecnología elimina por completo las limitaciones y riesgos impuestos por la variabilidad climática externa (Rajasegar, 2023a). En estos sistemas, factores críticos como la temperatura, la humedad, la luz y la concentración de CO₂ son regulados de manera precisa para optimizar el crecimiento de las plantas durante todo el año, independientemente de las condiciones externas (Kitzinger, 2005).

Más allá de la independencia climática, los sistemas verticales representan un paradigma de eficiencia. (NEIKER, 2024) Diseñados para optimizar radicalmente el uso de insumos, destacándose la eficiencia en el uso del agua mediante técnicas de recirculación en sistemas hidropónicos o aeropónicos, que pueden reducir el consumo hídrico entre un 70% y un 95% en comparación con la agricultura tradicional en campo.

Al prescindir del suelo convencional y utilizar sustratos inertes o cultivo sin suelo, se elimina por completo el problema de la erosión, además de que permite un uso más intensivo y sostenible del espacio disponible (Martínez & Gómez, 2021). Esta combinación de protección climática, eficiencia de recursos y sostenibilidad posiciona a la agricultura vertical como una herramienta crucial para construir un futuro agrícola más seguro y menos vulnerable frente a la crisis climática (Pennisi et al., 2025) .

2.7.Contexto nacional e internacional del maíz amarillo

El maíz es uno de los cultivos más producidos a nivel mundial y constituye un pilar de la seguridad alimentaria y del sector pecuario. En 2023 la producción global de maíz alcanzó un récord cercano a 1,207 millones de toneladas, impulsada principalmente por Estados Unidos y China. México, país de origen del maíz, ocupa aproximadamente el octavo lugar mundial en volumen producido con 26-28 millones de toneladas anuales, participando con cerca del 2% de la producción total. A pesar de esta importancia productiva, México se ha convertido también en uno de los mayores importadores mundiales de maíz(Servicio de Información Agroalimentaria y pesca, 2023) .

En México se siembran principalmente dos tipos de maíz grano: blanco, destinado al consumo humano (tortillas, alimentos tradicionales), y amarillo, empleado mayoritariamente como insumo industrial y forrajero (alimento para ganado y producción de edulcorantes, almidones). El maíz blanco domina la producción nacional (representa alrededor del 85-90% del total), mientras que el maíz amarillo constituye una fracción menor. Por ejemplo, en el periodo agrícola 2021-2022 México produjo aproximadamente 21.9 millones de toneladas de maíz blanco y apenas 3.47 millones de toneladas de maíz amarillo, evidenciando la limitada producción de este último. Consecuentemente, la oferta interna de maíz amarillo resulta insuficiente para la demanda (Fideicomisos Instituidos en Relación con la agricultura, 2024).

Según cifras oficiales, la producción de maíz amarillo apenas cubre entre 24% de los requerimientos nacionales, dependiendo del año analizado, debiéndose importar cerca de dos terceras partes o más del maíz amarillo consumido en el país (Servicio de Información Agroalimentaria y pesca, 2023). En 2024 las importaciones totales se estimaron en alrededor de 23.8 millones de toneladas, consolidando a México como el mayor comprador mundial de maíz y desplazando a China al segundo lugar. Prácticamente toda la importación corresponde a maíz amarillo transgénico de Estados Unidos, utilizado en la industria pecuaria y de alimentos procesados. Esto refleja una fuerte

dependencia externa de un grano estratégico y plantea riesgos para la soberanía alimentaria ante shocks internacionales(Servicio de Información Agroalimentaria y pesca, 2023) .

México es autosuficiente en maíz blanco para consumo humano, e incluso uno de los principales productores mundiales de maíz blanco. Sin embargo, el crecimiento del consumo total de maíz ha superado con creces al de la producción interna en las últimas décadas. Entre 1994 y 2025, la producción nacional de granos aumentó sólo 18% mientras el consumo creció 147%. En el caso del maíz, México pasó de una autosuficiencia aproximada del 72% en la década de 1990 a solo 42% en la actualidad. Es decir, hoy el país produce apenas la mitad del maíz que consume(Carbajal, 2024).

Esta brecha ha venido incrementándose bajo el contexto del libre comercio norteamericano con importaciones de maíz que pasaron de 4.2 millones de toneladas en 2001 a casi 24 millones de toneladas en 2024. La diferencia recae principalmente en maíz amarillo de bajo costo, cuyo flujo ha desplazado la producción interna, especialmente afectando a los productores de menor escala (Red agrícola, 2024).

En síntesis, el contexto nacional del maíz amarillo en México se caracteriza por una crisis de producción interna y una dependencia crítica de las importaciones. Esto contrasta con su relevancia histórica y cultural y con su peso económico. El contexto internacional, por su parte, ubica a México como un actor que actúa como octavo productor mundial pero primer importador neto de maíz. Estados Unidos figura como su principal socio proveedor, facilitado por la integración comercial y geográfica. Este alto grado de dependencia externa en un cultivo básico expone a México a la volatilidad de los mercados globales de cereales, a fluctuaciones cambiarias y a disposiciones comerciales internacionales.

Todo ello configura un escenario complejo que demanda innovaciones y estrategias para fortalecer la producción interna sostenible de maíz, particularmente en la variedad amarilla, objetivo en el cual se inscribe la propuesta de cultivo vertical urbano que se describe en esta tesis.

2.8. Problemáticas actuales de la producción en México

La producción de maíz en México enfrenta múltiples problemáticas estructurales y coyunturales que han contribuido a la situación de estancamiento y dependencia. Entre las principales problemáticas actuales se identifican las siguientes:

Fragmentación agraria y pequeña escala productiva: El sector maicero mexicano se compone mayoritariamente de pequeños productores. De acuerdo con el Censo Agropecuario 2022, 82% de las unidades agrícolas del país disponen de menos de 5 hectáreas de superficie (Fideicomisos Instituidos en Relación con la agricultura, 2024). Esta elevada atomización implica que gran parte del maíz se produce en parcelas de minifundio, con bajos volúmenes comercializables y dificultades para lograr economías de escala (Fideicomisos Instituidos en Relación con la agricultura, 2024).

Baja productividad promedio: Los rendimientos nacionales de maíz se mantienen inferiores a los de otros países líderes. En promedio, México obtiene en maíz rendimientos del orden de 3.5 toneladas por hectárea (t/ha) aunque con variaciones importantes, los productores tecnificados de riego en Sinaloa logran hasta 11 toneladas por hectárea (t/ha), mientras que pequeños agricultores de temporal apenas alcanzan 2 t/ha. (Servicio de Información Agroalimentaria y pesca, 2023). Factores que explican la baja productividad general incluyen el uso limitado de semillas mejoradas, insuficiente mecanización, escaso acceso a fertilizantes de calidad, deficiente control de plagas y enfermedades. A pesar de avances puntuales, la transferencia tecnológica no ha permeado suficientemente en el estrato de pequeños productores tradicionales.

Dependencia de condiciones climáticas y vulnerabilidad al cambio climático: Aproximadamente 74% de la superficie de maíz en México es de temporal, por lo que depende exclusivamente de la lluvia. Esto hace que la producción varíe con el régimen pluvial anual. Eventos de sequía recurrentes se han vuelto una amenaza creciente, en 2023 se reportó que 78% del territorio nacional sufría sequía de moderada a extrema, lo que derivó en pérdidas de cosechas.

Organizaciones del sector estimaron que, debido a la sequía, la producción esperada del ciclo primavera verano 2023 caería en 1 millón de toneladas respecto al año (Servicio de Información Agroalimentaria y pesca, 2023) .

Elevados costos de producción contra los bajos precios de mercado: En los últimos años, los costos de insumos se han incrementado notablemente. Por ejemplo, el costo promedio de producción por hectárea de maíz blanco en Sinaloa subió 47% entre 2020 y 2023 (Fideicomisos Instituidos en Relación con la agricultura, 2024) , los precios de venta al productor han caído desde picos alcanzados en 2021 y 2022, siguiendo la baja de precios internacionales.

Políticas públicas insuficientes o cambiantes: En años recientes se han modificado los esquemas de apoyo al campo. Se eliminaron programas como Ingreso Objetivo y Agricultura por Contrato (Carbajal, 2024a) enfocando el apoyo gubernamental en programas asistenciales. Si bien estos apoyos han beneficiado a ejidatarios de baja escala, representan una fracción pequeña del volumen total producido. Muchos productores comerciales se quedaron sin cobertura de precios ni incentivos a la productividad, enfrentando solos la volatilidad del mercado.

Abandono del campo y problemas socioeconómicos: Las dificultades económicas y la falta de rentabilidad han llevado al abandono paulatino de tierras agrícolas y a la migración rural. Entre 1995 y 2023 se perdieron aproximadamente 2.25 millones de hectáreas sembradas de maíz en México, reflejo de productores que dejaron de cultivar por no obtener ingresos suficientes o por cambio de uso de suelo (Fideicomisos Instituidos en Relación con la agricultura, 2024) .

2.9. Actores clave involucrados

La compleja situación del maíz amarillo en México involucra a diversos actores clave, cuyas acciones e interacciones determinarán el éxito de cualquier iniciativa de mejora o innovación agrícola.

Productores agrícolas: Incluye desde pequeños campesinos hasta productores comerciales medianos y grandes. Los pequeños productores son custodios de una gran diversidad de razas nativas de maíz, pero suelen carecer de recursos financieros y tecnológicos. Las asociaciones campesinas han sido voces críticas de las políticas actuales, alegando abandono del campo y competencia desleal por las importaciones.

Gobierno y dependencias públicas: El gobierno, a través de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) anteriormente SAGARPA es un actor central en la definición de políticas, subsidios y programas dirigidos al maíz. Organismos desconcentrados como el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) proveen las estadísticas y pronósticos de producción y consumo, fundamentales para la toma de decisiones (Servicio de Información Agroalimentaria y pesca, 2023) (SAGARPA, 2017) .

Industria y sector privado: Dentro de este rubro destacan las industrias consumidoras de maíz amarillo, como el sector pecuario la industria del almidón, jarabes y otros derivados de maíz, así como grandes empresas productoras de alimentos procesados. Organizaciones como la Cámara Nacional del Maíz Industrializado (CANAMI) representan a las empresas que dependen de un abasto seguro de maíz amarillo para sus procesos.

Academia y centros de investigación: Las universidades y centros de investigación desempeñan un papel importante en la innovación agrícola. En particular, programas de investigación en agricultura protegida y cultivos hidropónicos podrían brindar las bases científicas para optimizar el cultivo vertical de maíz. Asimismo, la academia forma a los profesionales que implementarán estas técnicas.

Consumidores y sociedad civil: Los consumidores mexicanos son también actores en la cadena del maíz. Organizaciones de la sociedad civil han abogado por la soberanía alimentaria y la protección del maíz nativo. Asimismo, hay creciente interés en productos locales, orgánicos y sostenibles en mercados urbanos. Un proyecto de maíz vertical urbano podría apelar a este segmento de consumidores conscientes.

Actores internacionales: Dado que el sistema maíz de México está imbricado globalmente, merece mención la influencia de actores extranjeros. El gobierno de Estados Unidos y sus organismos (USDA) monitorean de cerca las políticas mexicanas. Los exportadores de maíz de EE.UU., agrupados en asociaciones de granos, tienen interés en mantener el acceso al mercado mexicano. Asimismo, organismos multilaterales como la FAO proveen asistencia técnica en materia de maíz. Cualquier estrategia de producción interna, incluyendo innovaciones verticales, ocurre en un contexto donde los precios internacionales, acuerdos comerciales y tecnologías globales tendrán influencia.

En conjunto y tal como se aprecia en la Figura 2, estos actores conforman un sistema agroalimentario en torno al maíz. Para que la adopción de cultivo vertical de maíz enano prospere, será necesaria la colaboración entre actores, productores organizados dispuestos a innovar, sector privado aportando tecnología e inversión, academia brindando validación y capacitación, y autoridades facilitando con políticas e incentivos.

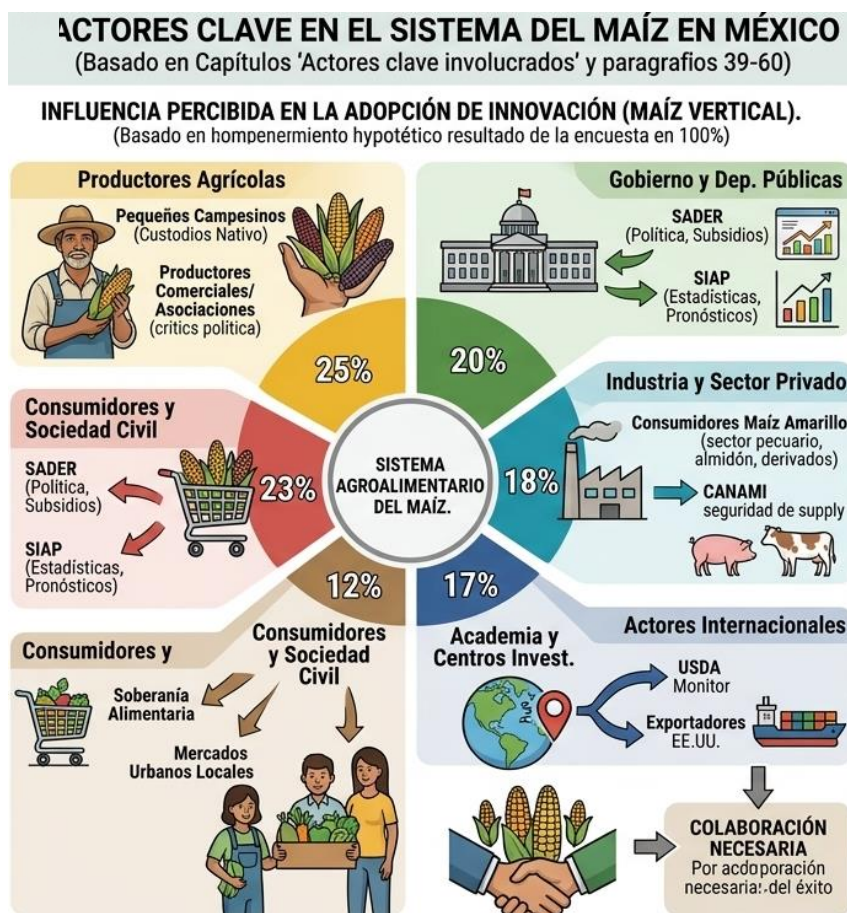


Figura 2. Principales actores.

Fuente: Elaboración propia.

2.10. Externalidades positivas y negativas del cultivo vertical de maíz

La producción de maíz en sistemas agrícolas verticales, bajo condiciones controladas usando variedades de porte bajo representa una innovación cuyo impacto trasciende la simple productividad, generando diversas externalidades tanto positivas como negativas. A continuación, se examinan dichas externalidades, entendidas como efectos colaterales (ambientales, sociales, económicos) asociados a la adopción de esta tecnología, más allá del rendimiento directo del cultivo.

2.10.1. Externalidades positivas

Uso eficiente del espacio y aumento de la producción urbana: La agricultura vertical permite aprovechar espacios reducidos en zonas urbanas o periurbanas

al cultivar en múltiples niveles apilados. Esto conlleva una intensificación de la producción por unidad de superficie. Este incremento de la productividad ayuda a aumentar la oferta local de maíz reduciendo la presión sobre tierras agrícolas rurales y potencialmente contribuyendo a la seguridad alimentaria urbana.

Al desarrollarse en ambientes controlados, el cultivo vertical es prácticamente inmune a los eventos meteorológicos extremos y a la estacionalidad. Sequías, inundaciones, heladas o huracanes no afectan a los cultivos interiores. Esto proporciona estabilidad en la producción y un suministro continuo todo el año, lo cual es una ventaja enorme frente a la variabilidad que enfrenta la agricultura tradicional de temporal. En el contexto del cambio climático, esta resiliencia climática es una externalidad positiva que reduce el riesgo agroclimático y brinda certeza tanto a productores como a la industria usuaria del maíz.

Reducción en el uso de agroquímicos y menor impacto ambiental local: Las granjas verticales operan en entornos altamente sanitarios y controlados, lo que posibilita prescindir de pesticidas y herbicidas químicos. Al estar aisladas de plagas externas y malezas, se pueden manejar las incidencias con control biológico. Asimismo, al no requerir labores de arado ni tractores en campo, se reducen las emisiones de CO₂ y contaminantes asociados a la maquinaria agrícola tradicional (Despommier, 2013) argumenta que una adopción masiva de agricultura vertical podría incluso ayudar a mitigar el cambio climático al disminuir la necesidad de deforestar nuevas tierras y permitir reforestar antiguas tierras agrícolas, dadas las menores superficies requeridas para producir la misma cantidad de alimentos.

Ahorro y reciclaje de agua y nutrientes: Los sistemas hidropónicos o aeropónicos verticales logran eficiencias hídricas notables, utilizando hasta un 70-95% menos agua que la agricultura convencional de suelo. El agua se recircula en circuitos cerrados, minimizando pérdidas por evaporación o infiltración. Dado que México enfrenta estrés hídrico en amplias regiones, esta reducción en la huella hídrica es un beneficio ambiental importante. Adicionalmente, los nutrientes no se lixivian al subsuelo, sino que son aprovechados casi totalmente por las plantas, el

excedente se recupera en el depósito. Como externalidad, esto implica menos contaminación de mantos freáticos por nitratos u otros agroquímicos y una utilización más efectiva de insumos fertilizantes.

Proximidad al consumidor y reducción de transporte: Ubicar la producción de maíz dentro de entornos urbanos acerca el producto al consumidor final o a las industrias locales que lo procesan. Esto genera la externalidad de disminuir las distancias de transporte y, por tanto, las emisiones y costos asociados a la logística de distribución. En lugar de transportar maíz miles de kilómetros una parte podría cosecharse localmente para ciertos nichos, reduciendo la dependencia de combustible fósil en camiones o trenes. Además, la frescura del producto sería mayor, beneficiando al consumidor. Esta deslocalización positiva de la producción contribuye a la sustentabilidad urbana y a concientizar a la población sobre la agricultura.

2.10.2. Externalidades negativas.

Alto consumo energético y huella de carbono asociada: La mayor desventaja de la agricultura vertical es su intensa dependencia de energía eléctrica para iluminación artificial (LEDs), climatización (enfriamiento o calefacción), bombeo de soluciones, etc. Si esta energía proviene de fuentes fósiles, la huella de carbono puede ser significativa. Esto representa un consumo aproximadamente 5 veces mayor, lo que se traduce en costos operativos elevados y potencial emisión de CO₂ (indirecta, vía generación eléctrica).

Elevada inversión de capital y costos de infraestructura: El montaje de una granja vertical de maíz requiere infraestructura especializada: estructuras multi-nivel, sistemas de iluminación LED, control ambiental, sensores, sistemas hidropónicos. El costo inicial de construcción es sustancialmente mayor que el de establecer un cultivo tradicional en tierra. Adicionalmente, en entornos urbanos el precio del suelo o inmuebles es alto.

Limitaciones biológicas y necesidad de variedades especiales: No todos los cultivos se adaptan bien al ambiente vertical. El maíz es una planta normalmente alta y de ciclo más largo que las hortalizas de hoja, lo que presenta desafíos. Es

imprescindible utilizar variedades enanas o de porte bajo que puedan crecer en espacios limitados en altura. Incluso las variedades enanas tendrán cierta restricción en el número de niveles apilables. Además, el maíz tiene altos requerimientos nutricionales de nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) para lograr buenas mazorcas, lo que demanda soluciones nutritivas concentradas y preciso monitoreo. Como externalidad negativa, esto implica una mayor complejidad técnica en el manejo del cultivo vertical de maíz respecto a otros cultivos verticales típicos.

Escala de producción limitada y nichos de mercado: Aun logrando implementar granjas verticales de maíz, es probable que en el corto plazo su producción sea relativamente pequeña comparada con la demanda nacional, por tanto, su aporte podría concentrarse en mercados nicho: maíz para elote tierno gourmet en ciudades, maíz para forraje verde hidropónico en granjas locales de alta gama, o insumos especializados. La externalidad económica de esto es que el costo por tonelada será mayor, pudiendo traducirse en un precio más alto del producto final.

Consideraciones ecológicas y de biodiversidad: Si bien la agricultura vertical elimina el impacto local sobre suelos, podría argumentarse que no contribuye a la biodiversidad agrícola en el sentido tradicional. Las granjas verticales suelen enfocarse en unas pocas variedades altamente optimizadas, lo que no favorece la conservación de la diversidad genética in situ. En el caso de maíz, la domesticación en vertical seguramente usaría híbridos o líneas seleccionadas por su baja altura, posiblemente marginando las razas nativas que no se adaptan a estas condiciones. Aunque esta externalidad es debatible, la innovación podría orientarse a unas cuantas variedades comerciales, reduciendo la demanda de las demás.

2.11. Relaciones conceptuales

En la Figura 3 se sintetizan las principales relaciones conceptuales asociadas al cultivo vertical de maíz enano en contextos urbanos. La agricultura vertical se presenta como eje articulador entre la agricultura urbana y la seguridad alimentaria, al posibilitar la producción de alimentos en espacios reducidos y cercanos al consumidor. A su vez, la incorporación de tecnologías sostenibles y una gestión eficiente del agua contribuyen a mejorar la sostenibilidad urbana y a reducir el impacto ambiental de la producción agrícola.



Figura 3. Principales conceptos de agricultura vertical.

Fuente: Elaboración propia.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Experimento del prototipo

Este estudio adoptó un enfoque metodológico mixto que integra tanto la investigación cuantitativa experimental como la recolección cualitativa de datos. La vertiente cuantitativa se concentra en la construcción y evaluación de un prototipo de cultivo vertical de maíz enano bajo condiciones controladas, lo que permitió medir la eficiencia y factibilidad técnica del sistema. Paralelamente, la vertiente cualitativa se basó en entrevistas a productores y técnicos especializados, diseñadas con preguntas base, pero con flexibilidad para explorar en profundidad las percepciones y opiniones de los agricultores, lo que enriquece la comprensión contextual y aporta matices importantes a los hallazgos (Hernández Sampieri et al., 2014).

Se realizó una revisión bibliográfica y un análisis comparativo de los costos de producción del maíz convencional, con el propósito de evaluar y contrastar los costos económicos y el consumo de agua del prototipo de cultivo vertical, estableciendo así su viabilidad económica y ambiental en comparación con la agricultura tradicional. Estudios previos han señalado que la combinación de métodos cuantitativos y cualitativos proporciona resultados más robustos y confiables, al aprovechar las fortalezas y neutralizar las limitaciones de cada enfoque, lo que se conoce como triangulación metodológica (Creswell & Creswell, 2017). Este diseño permite un análisis integral y una mejor validación de los datos recolectados, facilitando una evaluación completa del potencial del cultivo vertical en términos técnicos, económicos y sociales.

La primera pregunta de investigación, centrada en la optimización productiva con el fin de una reducción del impacto ambiental y de recursos hídricos, se abordó mediante el componente experimental cuantitativo. El prototipo de cultivo vertical permitió cuantificar variables clave como el rendimiento por metro cúbico, la eficiencia en el uso de agua, la huella energética del sistema y el costo estimado del sistema.

Estos datos se contrastaron estadísticamente con los indicadores de la agricultura convencional de maíz, utilizando bases de datos oficiales (Fideicomisos Instituidos en Relación con la agricultura, 2024) y modelos de análisis de ciclo de vida simplificado. Paralelamente, las entrevistas semiestructuradas a actores clave del sector agrícola permitieron identificar percepciones sobre la viabilidad técnica y adaptabilidad climática del sistema, enriqueciendo la interpretación de los resultados numéricos con perspectivas contextuales.

3.1.1. Materiales y métodos

El prototipo de cultivo vertical experimental consistió en un panel de PVC vertical con múltiples niveles de cultivo. En la estructura se fijaron columnas tubulares verticales dispuestas en fila, de modo que en cada columna se insertan módulos con plantas. Esta configuración maximiza la densidad de plantas por área, como lo permiten sistemas similares de cultivo vertical. El cuadro de soporte se construyó con perfiles de acero galvanizado, con una separación de niveles de 90 cm para dar espacio al crecimiento de cada mazorca de maíz.

Las consideraciones para la elaboración del prototipo engloban diversos materiales y uso de recursos, los cuales se explican a continuación:

Iluminación: Se emplearon lámparas LED de cultivo de alta eficiencia energética, (10,000 luxes) con espectros ajustables principalmente en las bandas roja y azul, óptimas para fotosíntesis. Estas luminarias generan poco calor comparado con lámparas tradicionales y permiten ahorrar energía (40% de ahorro en LED). El fotoperíodo simulado fue de 6 horas diarias para los periodos de menos luz solar (septiembre, octubre, noviembre de 2024).

Por otro lado, se utilizó como sustrato una mezcla inerte de turba y perlita seleccionada por su buena retención de humedad y aireación de raíces, con eso se espera asegurar que ninguna otra variable influya en el crecimiento de las plantas. Estos materiales no aportan nutrientes, por lo que la nutrición completa se brinda mediante la solución nutritiva.

De igual manera se utilizó una solución nutritiva balanceada tal como se aprecia en el Cuadro 1, con una bomba sumergible la cual envía la solución desde un tanque común a todas las columnas, proporcionando agua y nutrientes directamente a las raíces. El exceso retorna al depósito, recirculándose continuamente. Este sistema minimiza el desperdicio de agua, ya que todo el volumen circula y solo se repone por evaporación o absorción.

Cuadro 1. Solución nutritiva del experimento.

MACRONUTRIMENTOS	Para 1,000 L
Nitrato de calcio:	1228 gm
Nitrato de potasio:	646.48 gm
Sulfato de Magnesio:	950 gm
Ácido fosfórico:	172.5 ml
MICRONUTRIMENTOS	
Sulfato ferroso:	37.2 g
Sulfato de manganeso:	4.06 g
Sulfato de cobre:	1.97 g
Sulfato de zinc:	2.2 g
Ácido bórico:	2.9 g

Fuente: elaboración propia.

Parámetros microclimáticos: El cultivo se desarrolló en un invernadero. Se mantuvo una temperatura diurna de 25 °C y una humedad relativa de 60%. Se utilizó ventilación mecánica. Se registraron con sensores continuos los valores de temperatura, humedad y conductividad de la solución, se midió el potencial de hidrogeno (ph) a través de tiras de laboratorio.

Ubicación geográfica y condiciones ambientales: El experimento se situó en Texcoco, Estado de México, a 2,247 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m), en un clima templado como se aprecia en la Figura 4. La temperatura media anual es 15.9 °C y la precipitación anual de 686 milímetros (mm), condiciones bajo las cuales el cultivo de maíz tradicional enfrenta retos de agua y clima. Texcoco es

representativo de zonas agrícolas del altiplano central, con tradición en cultivo de maíz y acceso a productores locales con experiencia en la región.

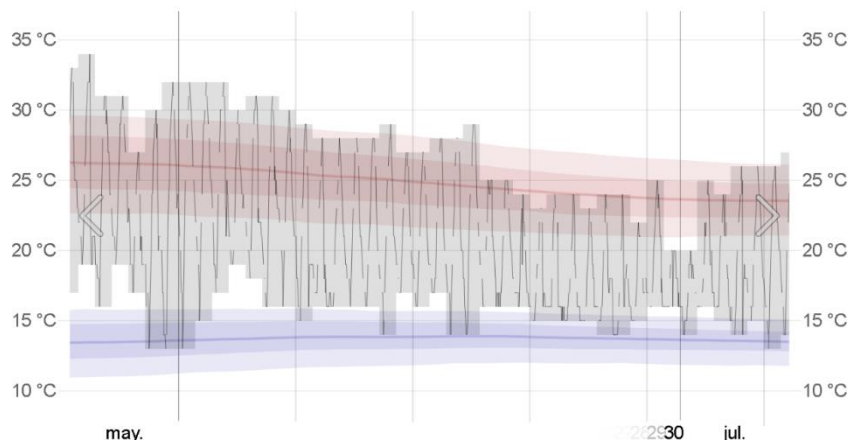


Figura 4. Temperaturas promedio de Texcoco de mora, Estado de México, México.

Fuente: Weatherspark, 2026.

Variedad de maíz enano: Se seleccionó una variedad híbrida de maíz enano (de porte reducido) adecuada para sistemas protegidos. Estas variedades, portadoras de genes braquíticos, que concentran más recursos en el desarrollo de la mazorca y muestran buena tolerancia al viento y a altas densidades de siembra. Por ejemplo, se eligió un híbrido de maíz enano tipo dulce de maduración temprana, cuyo porte compacto permite su cultivo en capas verticales. Estudios han mostrado que los maíces enanos pueden alcanzar eficiencias agronómicas comparables a los altos, con mayor captura de nitrógeno y biomasa adaptada al tamaño reducido.

Entrevistas cualitativas: Paralelamente, se aplicaron 25 entrevistas a productores agrícolas de Sinaloa. Los entrevistados fueron seleccionados por muestreo por conveniencia, buscando diversidad de edad y tamaño de explotación. Cada entrevista siguió unas preguntas específicas, pero con espacio para preguntas exploratorias. El objetivo fue evaluar la aceptabilidad y factibilidad percibida del cultivo vertical de maíz, así como identificar barreras socioeconómicas. Se

anotaron comentarios sobre la viabilidad económica, las ventajas ambientales percibidas.

3.1.2 Descripción del experimento

El 9 de febrero de 2025 se administraron los espacios del invernadero para instalar los sistemas verticales, delimitando áreas y preparando estanterías. Posteriormente, el 1 de marzo de 2025 se colocó plástico sobre el suelo del invernadero para eliminar vegetación no deseada, tal como se puede apreciar en la Figura 5 se construyeron estructuras de soporte para los sistemas verticales y se instaló el reservorio de agua principal. Estos preparativos iniciales establecieron el entorno adecuado para el cultivo.



Figura 5. Sistemas verticales en estados iniciales.

Fuente: Elaboración propia.

El 3 de junio de 2025 se definió la formulación nutritiva para los cultivos sin suelo, preparando la solución química de nutrientes. Ese mismo día se revisaron protocolos de siembra en charolas para optimizar la germinación de las plántulas. El 11 de junio se sembraron las semillas de maíz en las charolas, dando inicio simultáneo a los experimentos A y B. El 22 de junio se instaló el sistema de riego

subterráneo de una pulgada debajo de los módulos verticales tal como es posible apreciar en la Figura 6. El 24 de junio se completaron los módulos de soporte para el experimento A y se realizaron los trasplantes de las plántulas de las charolas al sistema A. Inmediatamente después del trasplante (24 de junio), las plántulas del experimento A se encontraban en la etapa vegetativa V1 (una hoja visible).



Figura 6. Sistema subterráneo de sistemas verticales.

Fuente: Elaboración propia.

Al inspeccionar nuevamente el 30 de junio, la mayoría de las plántulas de A habían sobrevivido y habían avanzado a la etapa V2 (dos hojas), dos de ellas, sin embargo, murieron durante el trasplante y fueron reemplazadas por plántulas hermanas. En contraste, en el experimento B sólo emergieron dos plántulas de las sembradas en charolas.

Durante los primeros días de julio continuó el crecimiento de A: el 2 de julio las plántulas seguían sanas, se detectaron problemas hidráulicos en el sistema A: el 2 de julio las tuberías de riego se obstruyeron, reduciendo la presión. Para corregirlo se utilizó un alambre para estabilizar el flujo; ese mismo día las plantas alcanzaron la etapa V3 tal como se aprecia en la Figura 7. El 7 de julio se resolvió

definitivamente la alta presión ajustando el nivel del tanque de agua, lo que permitió que las plántulas de A avanzaran a la etapa V4. Ese día un tubo de PVC se soltó debido a la presión acumulada en las conexiones, lo que evidenció la necesidad de reforzar las uniones en los codos del sistema de riego.



Figura 7. Plantas en v3 (3 hojas desarrolladas).

Fuente: Elaboración propia.

El 1 de agosto una tubería PVC subterránea del sistema se rompió por sobrepresión, estresando a los cultivos. Al día siguiente (2 de agosto) el experimento A sufrió una inundación interna de agua, que rompió componentes internos del sistema de riego. Para garantizar el suministro continuo, se instaló un circuito adicional de riego. A principios de mes se observó que las plantas de A tenían un grosor de tallo considerable, indicando un desarrollo vigoroso. Sin embargo, a partir del 4 de agosto aparecieron deficiencias de nutrientes: el

experimento A mostró síntomas de falta de magnesio como se aprecia en la Figura 8, con la falta de magnesio las plantas tienden a amarillarse, por lo que el 7 de agosto se duplicó la concentración de magnesio en la solución nutritiva. El 9 de agosto se duplicó también la dosis de hierro. Estos ajustes permitieron una mejoría gradual: el 19 de agosto las plantas de A mostraron signos de recuperación, y en las charolas de siembra la mayoría de las plántulas habían crecido lo suficiente para ser trasplantadas.



Figura 8. Imagen de deficiencia de magnesio en las puntas de las hojas.

Fuente: Elaboración propia.

El 20 de agosto se trasplantaron las plántulas a los experimentos C y D; en ese momento ambos alcanzaron la etapa V2, tal como se aprecia en la Figura 9.



Figura 9. Fotografías de plántulas del experimento B y C.

Fuente: Elaboración propia.

A finales de agosto, el experimento A fue afectado por la aparición de hongos (25 de agosto) y posiblemente virus (26 de agosto), lo que obligó a reducir el riego a 10 minutos por hora y triplicar la concentración de potasio y magnesio en la solución nutritiva para contrarrestar la enfermedad, tal como se parecía en la Figura 10.



Figura 10. Experimento A con problemas de virus y hongos.

Fuente: Elaboración propia.

En septiembre se continuó el monitoreo fenológico de los cultivos. La fenología del maíz describe las etapas de su ciclo de vida desde la germinación hasta la maduración. En los experimentos C y D han alcanzado la etapa V3 (tres hojas). Para mediados de septiembre, C y D avanzaron a la etapa V4. Dada la alta demanda de agua en los sistemas C y D, el 19 de septiembre se detectó déficit hídrico, por lo que se aumentó el tiempo de riego a 12 minutos cada hora. Esto tuvo efecto inmediato: el 23 de septiembre las plantas en C y D llegaron a V5 y el 29 de septiembre a V6, mostrando un desarrollo vegetativo sostenido.

Durante los primeros días de octubre se atendieron contingencias y se preparó el siguiente experimento. El 2 de octubre se reparó una pequeña fuga en el sistema de bombeo anti humedad; sin embargo, un incidente causó la pérdida de una charola completa de plántulas. Aprovechando la experiencia adquirida, el 4 de octubre se inició la preparación del nuevo módulo experimental B. El 8 de octubre empezaron a brotar las semillas en las charolas destinadas a B. El 9 de

octubre se realizaron los trasplantes al sistema B, dando inicio al experimento B; en ese momento las plántulas de B estaban en etapa V1 (una hoja) mientras que en C y D habían alcanzado V7 (siete hojas). Finalmente, el 15 de octubre se detectó deficiencia de magnesio en el experimento C, por lo que se reforzó el nutriente correspondiente en la solución y se aprecia en la Figura 11.



Figura 11. Deficiencia de magnesio en Experimento C.

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Análisis de costos.

Respecto a la segunda pregunta, orientada a las ventajas en la mitigación de la degradación del suelo y la eficiencia recursos, se implementó un análisis comparativo multicriterio. Este incluyó la evaluación de la relación superficie cultivada por volumen producido. Se integró además datos secundarios de estudios previos sobre agricultura vertical y conservación de suelos. La complementación con entrevistas a expertos en gestión de recursos naturales permitió triangular la información cuantitativa con valoraciones cualitativas sobre sostenibilidad a largo plazo.

Los costos de producción del maíz convencional en México se dividieron en fijos (terreno, infraestructura, maquinaria) y variables (insumos agrícolas, energía, mano de obra, transporte) tal como se puede apreciar en el Cuadro 2, este cuadro ejemplificativo muestra los principales costos del productor de maíz en México del año 2023, estos costos se pueden desarrollar de la siguiente manera:

Costos variables: semillas híbridas, fertilizantes, plaguicidas, agroquímicos, combustibles (diésel) y electricidad para riego. Por ejemplo, la fuerte alza mundial de fertilizantes encareció drásticamente la fertilización del maíz

Mano de obra y cosecha: desde la preparación de suelo y siembra hasta la cosecha manual o con maquinaria. Son costos significativos, especialmente en parcelas pequeñas.

Agua y energía: en agricultura de temporal el agua de lluvia domina, pero en riego por gravedad o aspersión el bombeo consume electricidad. Ambas tarifas han subido, elevando el gasto energético.

Costos fijos: renta o compra de tierra agrícola, depreciación de maquinaria agrícola, infraestructura de almacenaje. Estos costos se reparten en el tiempo, aunque poco afectan costos por ciclo corto, pero sí la inversión inicial total.

Cuadro 2. cuadro de costos ejemplificativos de maíz.

Concepto	Cantidad
Preparación del terreno	\$ 2,000.00
Siembra	\$ 3,993.00
Fertilización	\$ 12,072.00
Riegos	\$ 5,600.00
Control de plagas, malezas y enfermedades	\$ 4,342.00
Cosecha, selección y empaque	\$ 2,100.00
Diversos	\$ 2,300.00
Total:	\$
	32,407.00

Fuente: Elaboración propia basada en datos de FIRA.

Las variaciones climáticas recientes han agregado presión: sequías y eventos extremos reducen rendimientos reales y obligan a realizar inversiones extras como puede ser el riego suplementario, afectando la viabilidad económica. En efecto, la producción nacional de maíz cayó a 26.5 Mt en 2022 (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2022) la cual es la más baja en cuatro años, por una menor siembra ante escasez hídrica en zonas clave. En el mismo periodo la alta demanda interna (tortilla, ganado, industria) mantuvo presionados los precios internos.

La gráfica siguiente ilustra la tendencia al alza de los costos promedio de producción de maíz (2016–2022), tal como se aprecia en la Figura 12 la comparativa de los precios y costos del maíz (2016-2022) muestra tendencias claras de los costos promedio de producción (línea azul), los cuales aumentaron de manera sostenida, mientras que los precios promedio domésticos (naranja) se mantuvieron relativamente estables hasta 2020 y luego repuntaron bruscamente en 2021-2022. En paralelo, el precio mundial del maíz (gris, convertido a pesos) cayó en 2020 y se elevó abruptamente en 2021. Estas alzas recientes de precios tanto internacionales como nacionales superaron ampliamente la inflación general, acercándose a aumentos de 25–30% anual.

Durante la pandemia (2020-21) el precio internacional del maíz subió 23.9% y el nacional 24.8%.

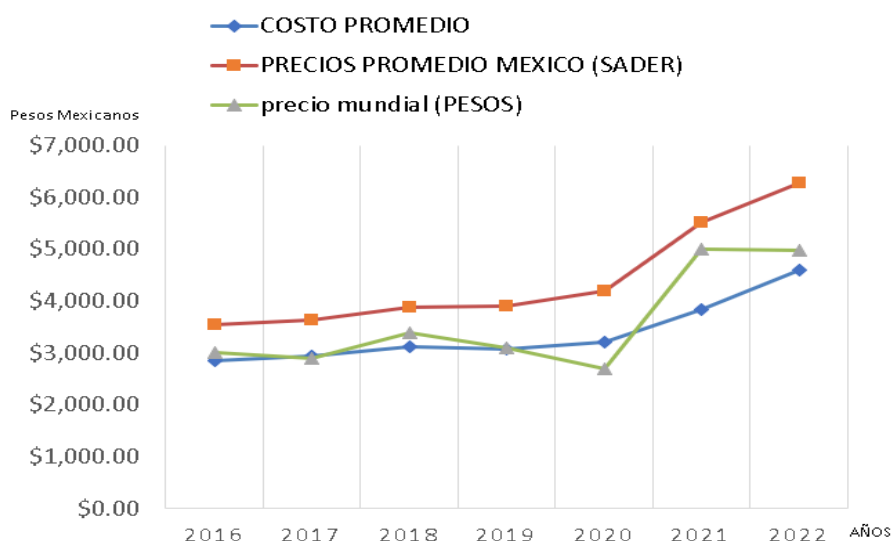


Figura 12. Tendencia de costos de producción de maíz en México (2016–2022).

Fuente: Elaboración propia sobre datos de FIRA.

La creciente brecha entre precios y costos obedece a múltiples causas estructurales. En primer lugar, la inflación de insumos agrícolas fue extraordinaria: según el Grupo Consultor de Mercados Agrícolas, el valor de las importaciones mexicanas de fertilizantes en 2022 se disparó 75% alcanzando 2 500 millones de dólares estadounidenses por la guerra Rusia y Ucrania, aunque el volumen apenas creció un 0.4% (Enciso L., 2021).

En ese sentido se han presentado incrementos en los costos de fertilización del maíz. A ello se suma el encarecimiento de otros insumos tales como la energía eléctrica y el diésel agrícola, mismos que aumentaron con la inflación general, elevando costos de bombeo y transporte. El peso mexicano también se depreció frente al dólar en 2019-2021, de 18 pesos mexicanos a 20 pesos mexicanos, encareciendo en pesos los insumos importados y el maíz foráneo (Carbajal, 2024).

En segundo lugar, las variaciones climáticas han reducido los rendimientos y estabilidad de la producción. Desde 2020 México enfrentó sequías y fenómenos

extremos: por ejemplo, en 2021-2022 el noroeste padeció una fuerte escasez de agua que afectó la siembra de maíz.

Además, las políticas y la dinámica de mercado influyen en los precios de garantía oficiales, que han orientado al alza los precios internos, así como la alta demanda interna (tortilla, ganado e industria) mantiene los precios nacionales relativamente altos. No obstante, la dependencia de las importaciones de maíz (principalmente amarillo de EE. UU.) expone al país a fluctuaciones externas. Según SIAP, en 2022 la producción nacional cayó a 26.5 millones de toneladas (Mt) (Servicio de Información Agroalimentaria y pesca, 2023) .

3.2.1. Consideraciones del análisis de costos

La brecha creciente entre precios y costos, junto con la volatilidad climática y comercial, afecta la viabilidad de la producción nacional y la seguridad alimentaria. Precios altos benefician a corto plazo al productor, pero encarecen el mercado interno y pueden estimular más importaciones, esto reduce el poder adquisitivo del pequeño agricultor y exige mayor inversión en insumos para mantener rendimientos. Esto refuerza la vulnerabilidad del sistema alimentario mexicano, donde los shocks externos (pandemia, guerras, clima) se transmiten directamente a precios internos.

En este contexto, el desarrollo de sistemas agrícolas resilientes y sostenibles cobra relevancia. Mejorar la resiliencia económica implica diversificar fuentes de producción y reducir la dependencia de insumos importados. Prácticas de agricultura de conservación, rotación de cultivos y nuevas tecnologías son parte de la respuesta. De acuerdo con la bibliografía sobre cambio climático y agricultura, fortalecer la producción local y la diversificación puede amortiguar impactos (Al-Kodmany, 2018).

3.3. Entrevistas con productores y técnicos

La tercera pregunta, relativa a políticas públicas e innovaciones tecnológicas, fue respondida mediante un análisis temático de las entrevistas, identificando barreras y facilitadores para la adopción de esta tecnología. La integración de estos hallazgos permitió elaborar propuestas de política pública basadas en evidencia técnica y social, así como modelos de escalamiento económico que consideren inversión inicial, costos operativos y retorno de inversión en distintos escenarios de implementación.

El propósito central de las entrevistas fue explorar en profundidad las perspectivas de productores, técnicos y actores institucionales sobre la aceptabilidad, factibilidad técnica y económica además de analizar las barreras sociales y políticas para la adopción de sistemas de cultivo vertical para maíz. Específicamente, se buscó lo siguiente: identificar percepciones sobre ventajas y desventajas operativas del sistema vertical frente al cultivo convencional, registrar experiencias y saberes locales, contrastar criterios de decisión del productor con los resultados experimentales sobre productividad.

La integración de evidencia cualitativa mediante entrevistas semiestructuradas constituye un componente esencial en el diseño metodológico de esta investigación, al complementar y enriquecer los resultados experimentales obtenidos del prototipo de cultivo vertical. Mientras las mediciones cuantitativas permitieron estimar con precisión rendimientos, consumos hídricos y costos operativos, las entrevistas ofrecieron acceso a las percepciones, motivaciones, barreras y condiciones contextuales que influyen en la viabilidad y escalamiento del cultivo vertical de maíz enano en entornos urbanos y urbanos.

Esta sección de la tesis se presenta la fundamentación y procedimientos generales que guiaron la recolección e integración de la información cualitativa, así como las decisiones metodológicas orientadas a garantizar la confiabilidad y la pertinencia de los datos.

3.3.1. Selección del perfil de los entrevistados

La muestra cualitativa estuvo compuesta por 25 entrevistas dirigidas principalmente a productores de maíz de la región de Sinaloa y a técnicos de campo, extensionistas y un número reducido de representantes de instancias públicas vinculadas a desarrollo agropecuario. La selección se realizó por muestreo por conveniencia intencional, priorizando la heterogeneidad en términos de tamaño de explotación (pequeña, mediana), experiencia productiva (nuevos vs. tradicionales) con el fin de captar una gama amplia de condiciones de productores (Etikan et al., 2016). Esta estrategia de muestreo responde al objetivo exploratorio y a la necesidad de obtener información rica y contextualizada para triangular con los datos experimentales.

3.3.2. Instrumento y modalidad de recolección

Se utilizó una guía de entrevista semiestructurada diseñada para balancear comparabilidad entre casos y flexibilidad para explorar respuestas emergentes. La guía incluyó bloques temáticos: antecedentes productivos y toma de decisión; prácticas de manejo y acceso a insumos, además agrego una sección para la percepción sobre riesgos (clima, mercado, plagas) con una opinión sobre tecnologías de cultivo protegido y vertical. Para optimizar la recolección y gestión de datos se integró un software de análisis multicriterio como herramienta de apoyo para registrar los datos de las entrevistas y almacenar transcripciones. Las entrevistas se realizaron en formato de videollamada para los productores y en indagaciones online para los técnicos en la mayoría de los casos, con duraciones promedio de entre 10 a 20 minutos.

3.3.3. Consideraciones éticas y consentimiento informado

Se comentó y se les hizo saber sobre la metodología ética de la entrevista. Antes de cada entrevista se explicó el objetivo del estudio y el tratamiento confidencial de la información. Se solicitó y registró consentimiento informado, incluyendo autorización para grabación de audio. En la presentación de resultados se resguardaron identidades mediante códigos y se evitó cualquier información que permitiera la identificación directa de los participantes.

3.4. Procedimiento de análisis y triangulación

Las transcripciones fueron sometidas a un *software* de hojas de cálculo para después ser pasado a un *software* multicriterio siguiendo una lógica inductiva y en base a esto se aplicaron varias medidas para aumentar la credibilidad y la confiabilidad de las entrevistas, eso se realizó con la triangulación de fuentes al recabar información de productores y técnicos de diferentes perfiles y con una reflexividad para identificar y controlar potenciales sesgos del investigador asociados a la posición institucional o expectativas sobre la tecnología. Es importante reconocer limitaciones inherentes al componente cualitativo en el muestreo por conveniencia no permite inferencias estadísticamente representativas de la población productiva regional; existe la posibilidad de sesgo de deseabilidad en respuestas relativas a prácticas “modernas” o al interés en recibir apoyo.

De manera ilustrativa, la Figura 13 resume el enfoque de triangulación metodológica adoptado en esta investigación. En ella se representan los tres componentes principales cuantitativo, cualitativo y comparativo junto con sus respectivas técnicas de recolección y análisis.

Estos elementos convergen en un proceso de integración y triangulación que permite validar los resultados de forma cruzada, proponer lineamientos de política pública y desarrollar modelos de escalamiento económico y ambiental.

Esta representación gráfica facilitó la comprensión del diseño mixto y su articulación práctica para abordar de manera integral las preguntas de investigación planteadas.

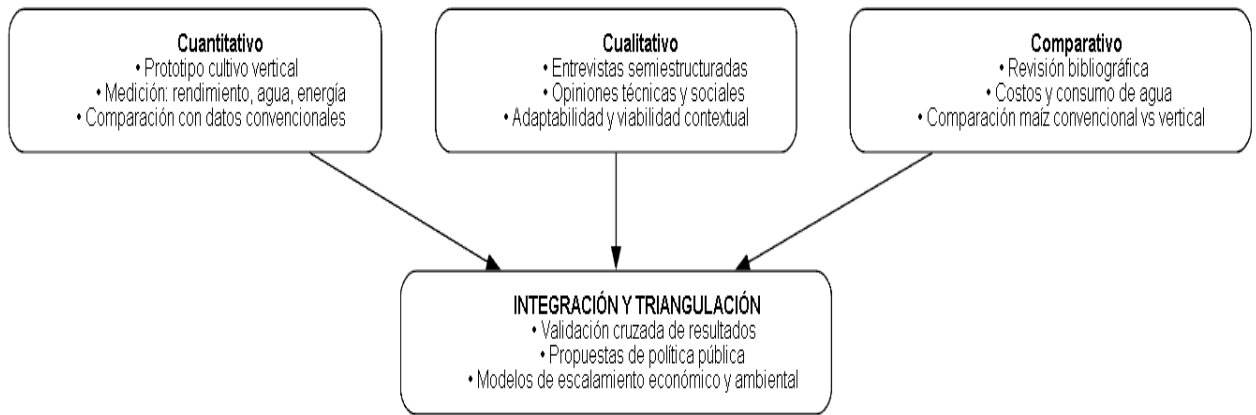


Figura 13. Diagrama de triangulación metodológica.

Fuente: Elaboración propia.

La triangulación metodológica asegura la validez de los hallazgos, mientras que el enfoque mixto facilitó la generación de recomendaciones robustas y contextualizadas, útiles tanto para la comunidad científica como para los tomadores de decisiones en el sector agroalimentario mexicano.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados de la optimización de la producción y reducción del impacto ambiental (pregunta 1)

Este capítulo presenta los resultados experimentales del cultivo vertical de maíz enano comparado con el cultivo convencional en campo abierto. En el contexto del proyecto general, se analizan la productividad y la sostenibilidad de ambas modalidades. Estudios previos en hortalizas indican que la agricultura vertical puede multiplicar la producción por área y reducir drásticamente el uso de recursos. Por ejemplo, se ha reportado que en un sistema vertical se alcanzan de 10 a 20 veces el rendimiento por superficie de cultivo abierto (Al-Chalabi, 2015b), e incluso una sola hectárea de agricultura vertical puede reemplazar a 10 hectáreas de cultivo convencional.

Asimismo, la recirculación en sistemas hidropónicos permite ahorros hídricos de hasta el 90% respecto a métodos convencionales (Herrera-Sánchez, 2025) . Los sistemas de agricultura en ambiente controlado (CEA, por sus siglas en inglés) han demostrado que pueden alcanzar producción de hasta 1,900 toneladas por hectárea por año en trigo en un sistema de 10 capas, comparado con solo 4.5 toneladas por hectárea por año en campo abierto (Rajasegar, 2023) . A nivel de eficiencia hídrica, la tecnología CEA requiere únicamente 0.14 litros de agua por kilogramo de grano producido, mientras que el cultivo convencional requiere aproximadamente 1,800 litros por kilogramo (Groves et al., 2009).

Los datos experimentales a continuación evalúan estos beneficios, mostrando rendimientos superiores y uso eficiente de agua y espacio en el prototipo vertical de maíz frente al cultivo en suelo.

4.1.2 Descripción del experimento y parámetros medidos

El experimento se realizó mediante un prototipo de cultivo hidropónico vertical basado en torres o columnas apiladas, tal como describen los sistemas verticales modernos. La estructura contó con 8 columnas independientes, cada una con 2 niveles horizontales de cultivo para maximizar el uso del espacio. En cada nivel se ubicaron 4 plantas, alcanzando así 64 plantas totales. El área basal del sistema fue de aproximadamente 1,2 m², con una altura total de 90 cm, lo que equivale a un volumen efectivo de cultivo. Este diseño multi-nivel permitió aumentar significativamente la densidad de siembra sin requerir más área horizontal, siguiendo la estrategia de distribuir las plantas desde el suelo hacia la fuente luminosa superior.

Materiales utilizados: La estructura portante se construyó con tubos de PVC con un diámetro de 50 mm y perfiles de acero galvanizado de un metro como soportes. El sustrato de cada cultivo fue una mezcla diferente en cada sistema, en los sistemas A y B se utilizó una mezcla de turba negra y perlita (70:30), que asegura buena retención de humedad y aireación de raíces, en el sistema C y D se utilizaron bolsas con 100% de turba. El sistema hidropónico incluyó un depósito de solución nutritiva con bomba sumergible de recirculación. La solución, balanceada en macro y micronutrientes (NPK, Ca, Mg, Fe, etc.) fue bombeada continuamente hacia cada nivel y retornaba al tanque, garantizando un uso eficiente del agua.

Variables ambientales controladas: Durante el cultivo se mantuvieron condiciones ambientales óptimas mediante control climático. La temperatura del aire en el invernadero vertical se reguló entre 18 y 24 °C, rango considerado ideal para cultivos protegidos. La humedad relativa se mantuvo alrededor de un 80%, lo cual favorece el crecimiento vegetativo sin promover enfermedades. El pH de la solución nutritiva se monitorizó diariamente y se ajustó para mantenerse entre 5.5 y 6.5, rango óptimo para la absorción de nutrientes en maíz hidropónico. También se controló la conductividad eléctrica (CE) de la solución, indicador de

la concentración salina total, y se ajustó para mantener los niveles adecuados de fertilización.

Localización y características agroclimáticas del sitio experimental: El prototipo se ubicó en Texcoco de Mora, Estado de México, 19.30°N, 98.53°O a una altitud de aproximadamente 2250 m sobre el nivel del mar. Según datos oficiales, el clima de Texcoco es templado semiseco, con temperatura media anual alrededor de 15.9 °C. En verano las máximas promedio llegan a 26 °C, mientras que en invierno las mínimas pueden descender a 3°C. La precipitación pluvial anual promedia 686 mm, concentrada principalmente en los meses de junio a septiembre. Estas condiciones exigen monitoreo de radiación solar y ventilación; sin embargo, el cultivo vertical se protegió en invernadero para aislarlo de heladas o lluvias intensas, aprovechando las condiciones templadas y soleadas de Texcoco.

Variedad de maíz enano utilizada: Se empleó un híbrido de maíz de porte reducido, desarrollado para cultivo intensivo. Este material genético presenta altura significativamente menor que el maíz tradicional (porte bajo), lo que incrementa su resistencia al vuelco y tolerancia a condiciones adversas. Al concentrar la energía en la formación de la espiga y reducir el gasto estructural en tallos, el maíz enano mantiene o incluso mejora la eficiencia de uso de nutrientes y agua. Por su precocidad, las cosechas se obtienen en ciclos relativamente cortos, y su compacto porte permite densidades de siembra más altas. Estudios recientes destacan que los híbridos de baja estatura permiten esquemas de cultivo de alta densidad incrementando la producción por unidad de área sin afectar la sanidad ni la estabilidad del cultivo. Estas características hacen al híbrido enano apropiado para cultivos en espacios verticales limitados, permitiendo hasta tres ciclos anuales por superficie cultivable.

Se registraron datos detallados de rendimiento y uso de recursos para evaluar la productividad y eficiencia del sistema. Entre los indicadores agronómicos se incluyeron: Rendimiento por planta en kilogramos (kg): peso promedio de grano

seco cosechado por planta al finalizar el ciclo, rendimiento por volumen de cultivo ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$): producción total de grano dividida por el volumen físico del sistema ($\text{área basal} \times \text{altura de cultivo}$), indicando la densidad productiva del espacio vertical, días hasta la cosecha: número de días desde la siembra hasta la madurez fisiológica (cosecha), reflejando la precocidad del híbrido, consumo de agua estimado: volumen de solución nutritiva consumido por ciclo o por planta (litros), evaluando el uso hídrico del sistema.

Cabe señalar que la agricultura vertical puede reducir el consumo de agua hasta en un 70% comparado con métodos tradicionales. Se midió el caudal bombeado y reposiciones de agua para cuantificar esta variable, índice de cosecha (IC): razón entre el rendimiento económico (peso de grano) y la biomasa total de planta; indicador de eficiencia de partición de la biomasa en producto utilizable, problemas fitosanitarios: se monitoreó la presencia de plagas o enfermedades durante el ciclo, documentando cualquier incidencia que pudiera afectar el cultivo, todos los parámetros anteriores del prototipo vertical se compararon con los resultados obtenidos en un cultivo convencional de maíz abierto en el mismo sitio. Para el control se sembraron 24 plantas del mismo híbrido en un parcelario adyacente, siguiendo prácticas agrícolas tradicionales y con la misma nutrición que en las plantas verticales. Esta comparación permitió contrastar rendimientos por planta y por área, consumo de agua y energía, índices de cosecha e incidencia fitosanitaria entre el sistema vertical y el cultivo a cielo abierto.

4.1.3 Rendimiento y productividad comparativa

En esta sección se comparan los indicadores de rendimiento del maíz enano en un sistema de cultivo vertical intensivo frente a un cultivo convencional en campo abierto. Se consideraron métricas como rendimiento promedio por planta, por unidad de área en kilogramos por metro cuadrado (kg/m^2) y por volumen en kilogramos por metros cúbicos (kg/m^3), así como el índice de cosecha, los días hasta la cosecha y el número estimado de ciclos anuales. También se calculó la productividad ajustada por recursos. Se incluyeron tablas con valores para ilustrar los datos obtenidos. Los resultados se discutieron según la literatura y el diseño experimental de 64 plantas en vertical vs. 24 en campo, se consideró posibles limitantes técnicos del prototipo como lo fue la proliferación de hongos y fallas hidráulicas. Finalmente se propuso una metodología estadística de comparación y se analizan cualitativa y cuantitativamente las ventajas y desventajas del cultivo vertical frente al cultivo tradicional.

En la Figura 14 se analizó un prototipo de cultivo vertical hidropónico con niveles apilados de plantas. Al disponer varias capas de cultivo sobre una misma huella de suelo, el rendimiento por unidad de área en kilogramos por metro cuadrado (kg/m^2) podría superar a un cultivo tradicional en campo. Sin embargo, cada planta de maíz en este sistema vertical tiende a producir menos grano en comparación con el campo abierto, esto según los datos del primer ciclo del experimento. El diseño experimental de 64 plantas verticales frente a 24 en el campo maximiza la densidad espacial del sistema vertical, para el primer ciclo se observó que 32 plantas en sistema vertical pueden producir lo mismo que 24 en manera tradicional, para el siguiente ciclo se está priorizando el espacio y colocar aún más plantas en el sistema vertical.

No obstante, es crítico monitorear condiciones como la humedad, ya que debido a la alta densidad y a un ambiente cerrado en experimento se enfrentó a problemas con hongos, por lo que algunas plantas del sistema vertical murieron, a lo que fueron rápidamente remplazadas para continuar con el experimento, además de que cualquier falla en el sistema hidráulico (bomba o tuberías) podría

afectar rápidamente el rendimiento, tal como ocurrió en el experimento y algunas plantas murieron por lo que tuvieron que ser remplazadas.



Figura 14. Sistema vertical de maíz en estado preliminar.

Fuente: Fotografía de elaboración propia.

En el cuadro 3 se pueden ver los datos duros de un cultivo convencional de maíz en campo abierto a uno vertical. En este esquema tradicional cada planta dispone de amplio espacio horizontal y desarrolla mazorcas más grandes y un mayor rendimiento por planta, el rendimiento por área de suelo (kg/m^2) es mucho menor que en el sistema vertical densamente apilado. Además, la agricultura de campo suele requerir mayor volumen de agua por kg producido, aunque su consumo eléctrico es casi nulo. En esta tesitura, un sistema vertical de alta tecnología puede consumir decenas a cientos de Kilovatios-hora por kilogramo de grano producido (kWh kg^{-1}) por lo que es necesario encontrar un sistema vertical mucho más eficiente con el fin de justificar este gasto extra. En conjunto, el cultivo convencional ofrece simplicidad y robustez a costa de mayor uso de tierra y agua, mientras que el cultivo vertical busca aumentar la producción por área y por ciclo anual a cambio de mayor complejidad técnica y consumo energético, para este primer ciclo se apreciaron resultados llamativos y alentadores como para continuar con un siguiente ciclo para mejorar los resultados.

Cuadro 3. Indicadores de rendimiento comparativo entre maíz convencional y vertical.

Indicador	Sistema vertical	Sistema convencional	Unidad
Rendimiento por planta	.400	.500	kg/planta
Rendimiento por área	3.2	2.4	kg/m ²
Rendimiento por volumen	5.3	2.4	kg/m ³
Días a cosecha	130	110	días
Ciclos anuales	2	1	ciclos/año

Fuente: Elaboración propia.

4.1.4 Eficiencia en uso de agua, espacio y energía

El análisis de recursos consideró cuántos kilogramos de grano se producen por unidad de insumo en base a el agua y energía invertida. Los sistemas verticales recirculan el agua, por lo que su consumo es bajo en comparación con el riego de campo, en datos del experimento se reportó ahorros de hasta un 95% menos consumo de agua en vertical. Esto se traduce en una productividad hídrica significativamente mayor en vertical, todo esto se puede apreciar en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Productividad de grano ajustada por recursos.

Métrica	Sistema vertical	Sistema convencional	Unidad
kg de grano por litro de agua	0.002	0.0017	kg/L
kg de grano por kWh de energía	15	1	kg/kWh

Fuente: Elaboración propia.

En términos energéticos, el cultivo vertical requiere bombas de agua por lo que la productividad energética aumenta en comparación del convencional, los consumos de 150 a 500 kWh para producir 1 kg de cultivo de vegetales de hoja larga, mientras que en la agricultura convencional el aporte de energía eléctrica es muy bajo. A continuación, en tal Cuadro 4 se presenta la productividad ajustada por recursos por ciclo de cultivo aquí se aprecia que el sistema vertical cuenta con una mayor eficiencia de ahorro de agua por ciclo, la cual es de 0.002 kg de grano por litro, o que es lo mismo a 500 litros de agua por kg de grano, también se apreció que el gasto de Kwh fue mucho mayor en el vertical con 15 por ciclo.

4.1.5 Mejoras con base en las lecciones aprendidas

Durante el primer ciclo experimental del cultivo de maíz enano en el prototipo de agricultura vertical se identificaron limitaciones operativas y fitosanitarias que comprometieron la continuidad y la uniformidad del ensayo. Con base en la experiencia acumulada, se implementaron una serie de modificaciones técnicas y de manejo orientadas a aumentar la resiliencia del sistema, asegurar la disponibilidad de plántulas, mejorar la uniformidad del riego y reducir la incidencia de enfermedades asociadas al exceso de humedad. A continuación, describo las siguientes mejoras:1. Almacigo modular en PVC para flujo continuo de plántulas

Se diseñó e instaló un almacigo tubular construido con secciones de PVC dispuestas verticalmente, como se aprecia en la Figura 15, por lo que permitió mantener un flujo constante de plántulas vigorosas listas para trasplante. El criterio de diseño priorizó la facilidad de llenado, drenaje controlado y acceso para extracción de plántulas en régimen continuo. Esta medida buscó evitar interrupciones en el calendario experimental derivadas de fallas de emergencia en las charolas convencionales.



Figura 15. Almacigo de plántulas.

Fuente: Elaboración propia.

2. Redundancia hidráulica: sistema de doble bomba

Dado que la fertirrigación constituye el componente crítico del sistema vertical, se implementó una configuración de doble bomba hidráulica en paralelo con conexión de presión compartida tal como se aprecia en la Figura 16. En esta configuración, ante la falla de la bomba principal, la bomba de respaldo inició automáticamente para mantener el caudal y la presión necesarios. Para mitigar el riesgo de sobrepresión se sugiere la incorporación de válvulas de alivio y reguladores de presión.



Figura 16. Sistema de redundancia hídrica.

Fuente: Elaboración propia.

3. Redundancia en cabezales de riego (manifold alterno)

Se añadió un segundo cabezal (manifold) de riego por línea de cultivo. Esta medida permite reconectar rápidamente la cintilla a un cabezal alterno ante taponamientos o rupturas, reduciendo tiempos de inactividad, tal como se ve en la Figura 17. El diseño facilita además tareas de limpieza y mantenimiento sin interrumpir el riego de todo el módulo.



Figura 17. Sistema principal con doble línea de riego.

Fuente: Elaboración propia.

4. Control documental y fenológico mediante cámaras time-lapse

Se instaló una cámara time-lapse para registrar de forma continua el desarrollo de las plantas y los eventos críticos, tal como se aprecia en la Figura 18. Se colocó la instalación de una segunda cámara para obtener vistas angulares complementarias y mejorar la resolución temporal y espacial del registro visual.



Figura 18. Cámara time lapse apuntada a los sistemas verticales.

Fuente: Elaboración propia.

5. Control de malezas y saneamiento con plástico negro

Se colocó plástico negro en las zonas no cultivadas y entre los tinacos para inhibir el crecimiento de malezas y facilitar el manejo sanitario. La colocación por debajo y entre depósitos redujo acumulación de vegetación de difícil remoción manual y disminuyó fuentes potenciales de contaminación.

6. Reformulación del sustrato

Se reemplazó la mezcla previa (turba + tezontle) por una combinación de turba, tezontle y estiércol de conejo. El objetivo fue mejorar la capacidad de retención de agua y la carga microbiológica beneficiosa del sustrato, manteniendo a la vez la aireación y el drenaje adecuados para el volumen radicular limitado en sistemas verticales.

7. Selección de redes para bolsas de cultivo con criterio sanitario

Frente a fallas de redes previas (pudriciones, acumulación de hongos), se seleccionó sistemáticamente la red que presentó mejores resultados de durabilidad y drenaje en ciclo anterior. Las nuevas bolsas y redes fueron

pretratadas y se prepararon en lotes para uniformizar su comportamiento en campo experimental.

4.2. Resultados de la pregunta 2: Ventajas para la mitigación de la degradación del suelo y eficiencia de recursos

4.2.1. Evaluación de sostenibilidad del sistema vertical

La agricultura vertical en invernaderos elimina la necesidad de suelo agrícola, evitando procesos de labranza y agotamiento de nutrientes. En el prototipo, el cultivo de maíz enano se realizó en torres hidropónicas cerradas que reciclan el agua y los nutrientes, reduciendo drásticamente el consumo hídrico. Por ejemplo, la productividad hídrica medida fue de 0.002 kg de grano por litro de agua (kg/L) en el sistema vertical versus 0.0017 kg/L en cultivo convencional, lo que equivale a un ahorro aproximado del 15% en agua por kilogramo producido. Además, al utilizar 64 plantas en 1.2 metros cuadrados (m²) contra 24 en el campo abierto el rendimiento por superficie basal fue 33% mayor y el número de ciclos al año se duplicó, incrementando sustancialmente la producción sin expandir área cultivada.

Asimismo, otros indicadores de sostenibilidad mostraron mejores resultados, esto, a pesar de que cada planta de maíz vertical rindió ligeramente menos la alta densidad compensa esta diferencia. El control ambiental permitió cosechas más predecibles, evitando pérdidas por sequías o inundaciones, por lo que la combinación de estos factores coloca al sistema vertical como una alternativa sostenible que libera tierra cultivable puesta alternativa es capaz de reducir la presión sobre terrenos agrícolas y protege el suelo y la biodiversidad (Tilman et al., 2017), todos los autores comentan con base en estudios contundentes que los cultivos verticales aumentan la eficiencia de nutrientes y agua, reducen el uso de pesticidas y la contaminación agrícola en general.

Desde la perspectiva de los propios agricultores y técnicos entrevistados, la sostenibilidad del sistema vertical fue notable. Varios productores mencionaron

que el cultivo controlado permite producir todo el año, ofreciendo mayor seguridad contra eventos climáticos extremos y evitando el desgaste del suelo. Además, valoran positivamente el incremento de rendimiento por unidad de espacio y por volumen de cultivo, a costa de una mayor complejidad técnica. En conjunto, la evaluación de sostenibilidad del sistema vertical indicó un balance favorable: se maximizó la producción en espacios urbanos reducidos mientras se conservan recursos hídricos y terrestres.

4.2.2. Comparación de costos y eficiencia hídrica

El uso de agua es uno de los mayores diferenciadores, en los sistemas verticales se recicla el agua residual por lo que los ahorros son grandes, en el experimento vertical se reutilizó la solución nutritiva, por lo que el sistema en general consumió alrededor del 45% menos agua por kilogramo de grano en comparación con el riego de campo, el objetivo es llegar a rendimientos de ahorro aún mayores tal como se muestra en la Figura 19. Está claro decir que el cultivo vertical exige inversión en infraestructura hidráulica pero tal inversión inicial logra que cada gota de agua se aproveche eficazmente y de tal manera mitigar la escasez hídrica.

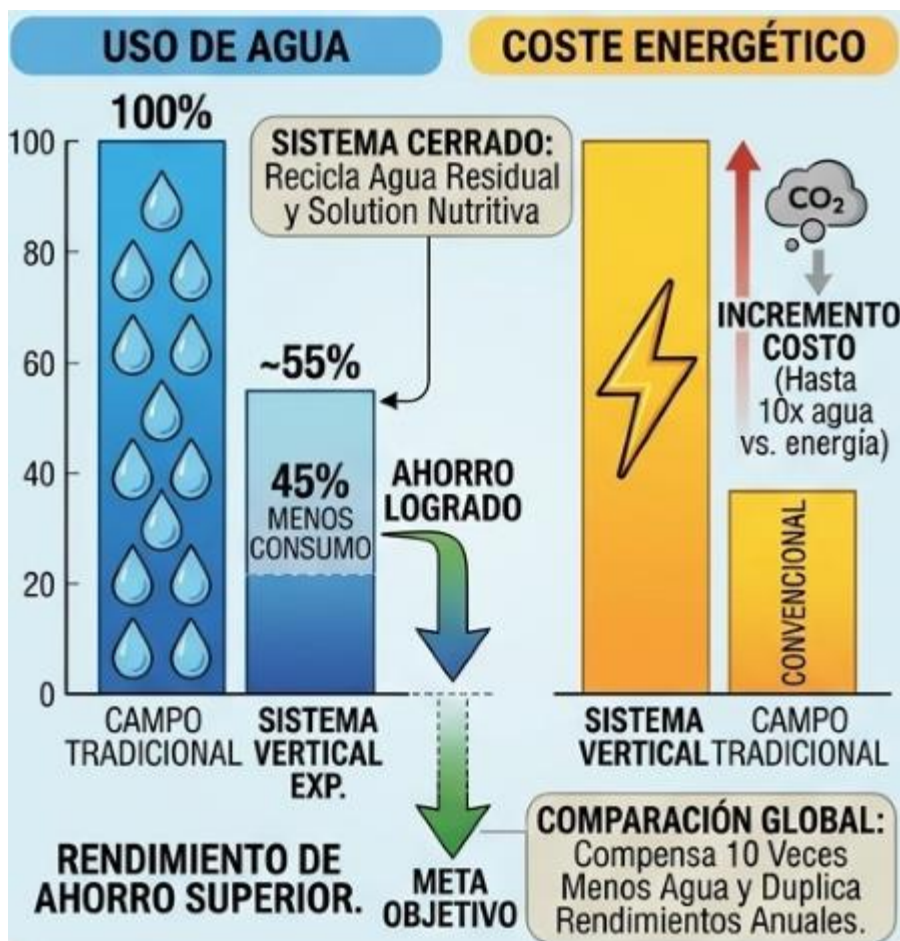


Figura 19. Comparativa de recursos por kg de maíz.

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los costos económicos, los sistemas de agricultura vertical presentan una inversión inicial y costos operativos considerablemente mayores en comparación con los sistemas de producción convencional. Como se observa en el Cuadro , los costos estimados de producción de maíz bajo un esquema vertical ascienden a \$46,700.00, considerando actividades como preparación del terreno, siembra, fertilización, riego, control de plagas, cosecha y empaque. En contraste, la producción vertical requiere, además de los costos propios del cultivo, inversiones asociadas con infraestructura especializada, sistemas hidráulicos, estructuras de soporte, iluminación artificial, equipos de bombeo y consumo de energía eléctrica, lo que incrementa de manera significativa el costo inicial y operativo del sistema.

Cuadro 5. Costos de producción de maíz vertical

Concepto	Cantidad
Preparación del terreno	\$ 5,000.00
Siembra	\$ 7,000.00
Fertilización	\$ 8,000.00
Riegos	\$ 12,000.00
Control de plagas, malezas y enfermedades	\$ 1,500.00
Cosecha, selección y empaque	\$ 5,000.00
Diversos	\$ 200.00
Riegos	\$ 5,000.00
Control de plagas, malezas y enfermedades	\$ 500.00
Cosecha, selección y empaque	\$ 1,500.00
Diversos	\$ 1,000.00
Total:	\$
	46,700.00

Fuente: Elaboración propia.

4.2.3. Beneficios ambientales

Los beneficios del cultivo vertical están relacionados con la conservación de recursos naturales. Al prescindir de suelo agrícola, se evita la erosión y compactación, por lo que no se degrada el perfil edáfico ni se agotan nutrientes sin reposición, por lo que al cultivarse en ambientes cerrados se minimiza el uso de pesticidas y herbicidas, reduciendo la carga de químicos en el ambiente. Por ejemplo, informes regionales destacan que la producción bajo cubierta vertical puede generar hasta 10 veces más producción por m² que la agricultura tradicional, al tiempo que elimina la contaminación por escorrentías y emisiones asociadas a la labranza.

Desde la perspectiva climática, la agricultura vertical contribuye a mitigar las emisiones indirectamente debido a que al incrementar la eficiencia de uso del agua y del espacio, se libera tierra que puede reforestarse y se reducen las emisiones de transporte al ubicar la producción cerca del consumidor. El alto índice de cosecha observado indica un uso óptimo de nutrientes, minimizando

desechos orgánicos, además de que el microclima controlado disminuye pérdidas postcosecha, con lo que se aprovecha más producto por ciclo, en el Cuadro 6 se aprecia un resumen de datos con el fin de dar una respuesta concisa a la segunda pregunta de investigación (SAGARPA, 2023).

Cuadro 6. Indicadores comparativos clave entre el cultivo vertical hidropónico y el cultivo convencional.

Indicador	Sistema vertical	Sistema convencional	Unidad
Rendimiento por planta	0.40	0.50	kg/planta
Rendimiento por área	3.2	2.4	kg/m ²
Rendimiento por volumen	5.3	2.4	kg/m ³
Agua usada por kg grano	500	588	L/kg
Ciclos anuales posibles	2	1	ciclos/año

Fuente: Elaboración propia.

Estos resultados confirman que el sistema vertical puede maximizar la producción por volumen y conservar recursos hídricos respecto a la siembra en campo abierto. En conjunto, todos los datos cuantitativos y cualitativos engendran ventajas significativas del cultivo vertical de maíz enano para mitigar la degradación del suelo y mejorar la eficiencia de recursos en el ámbito urbano.

Aunque cada planta de maíz en campo abierto produjo un poco más de grano individualmente, la densidad de cultivo vertical compensa esta diferencia: la alta densidad de 64 plantas en 1.2 metros cuadrados (m²) en contra de 24 metros cuadrados en campo abierto resulta en un rendimiento por área aproximado de 33% mayor.

El Cuadro 7 |presenta el consumo de agua por kg de grano y la eficiencia energética El cultivo vertical reutiliza el agua residual, por lo que se utiliza menos

agua por kilogramo de grano y tiene una productividad hídrica mayor. Asimismo, produce mucho más grano por unidad de energía: 15 Kilogramos por kilowatt hora (kg/kWh) en vertical frente a sólo 1 kg/kWh en el cultivo convencional. Esto se debe a que el sistema vertical utiliza intensivamente energía eléctrica, mientras que el campo abierto prácticamente no consume electricidad.

Cuadro 7. Comparación del consumo de agua y eficiencia energética del cultivo

Indicador	Cultivo vertical	Cultivo convencional	Unidad
Agua consumida por kg de grano	500	588	L/kg
Eficiencia energética (kg de grano/kWh)	15	1	kg/kWh

Fuente: Elaboración propia.

En resumen, el cultivo vertical ofrece importantes ventajas en productividad a nivel urbano. Produce más grano por área y por volumen con el mismo terreno y reduce el consumo hídrico. En contraste, el cultivo tradicional requiere menos energía y mayor espacio, pero es menos eficiente en recursos. Los datos comparativos muestran que el cultivo vertical de maíz enano presenta ventajas claras en rendimiento por área y eficiencia de recursos hídricos, aunque implica mayores costos energéticos, mientras que el cultivo convencional conserva simplicidad y bajo consumo energético, pero demanda más tierra y agua para igualar la producción.

4.3. Resultados de la pregunta 3: Políticas públicas e innovaciones tecnológicas necesarias en México

4.3.1. Análisis de entrevistas a productores y expertos

La Encuesta 1 analizó 10 factores clave del entorno productivo, las cuales son: tierra, agua, energía, mercados, transporte, mano de obra, mejoradores de suelo, prácticas innovadoras, tecnología agrícola y uso de fertilizantes o pesticidas ponderados según acceso, suficiencia, costo, empleabilidad y calidad. El análisis multicriterio (Figura 20) sitúa en la cima a los factores relacionados con insumos y tecnología: en primer lugar “Uso de fertilizantes y pesticidas” (factor 10), seguido por “Tecnología agrícola” (9), “Disponibilidad de tierras” (1), “Infraestructura de transporte” (5) e “Implementación de prácticas innovadoras” (8). En contraste, los elementos con peor desempeño fueron “Disponibilidad de mano de obra” (6) y “Mejoradores de suelo” (7).



Figura 20. Análisis de ponderación de pesos de encuesta número 1.

Fuente: Elaboración propia con software de análisis multicriterio.

Esto sugiere que productores, técnicos y expertos consideraron que la modernización del sector debe impulsarse primero mediante mejoras tangibles en el paquete tecnológico y en insumos (equipamiento, agroquímicos, asistencia técnica). En cambio, las carencias en capacitación laboral o en abonos orgánicos son percibidas como cuellos de botella estructurales a atender mediante servicios públicos. En otras palabras, la innovación práctica figura como prioridad inicial, mientras que los factores asociados a recursos humanos y calidad de suelo se dejan para etapas posteriores.

La Encuesta 2 evaluó siete alternativas de política o innovación según cinco criterios: factibilidad, rentabilidad, productividad, impacto ambiental y accesibilidad. El resultado multicriterio ponderado (Figura 21) indica claramente un orden de prioridad: en primer lugar “Inversión en transporte y logística agrícola” (Alternativa 6), seguido de “Uso de tecnologías de optimización de agua” (Alternativa 2) y “Inversión en infraestructura agrícola” (Alternativa 5). El resto (agricultura vertical, producción sin suelo, integración de productores) logro apreciar posiciones intermedias, mientras que la peor evaluada es “Acceso a financiamiento para invernaderos” (Alternativa 4).



Figura 21. Análisis de ponderación de pesos de encuesta número 2.

Fuente: Elaboración propia con software de análisis multicriterio.

La centralidad de la logística (Alt. 6) refleja que los encuestados consideran la conexión física y de servicios como habilitador sistémico: mejora la oportunidad de venta, reduce mermas y costos unitarios, y hace rentables otras innovaciones tecnológicas. En este sentido, la inversión en caminos rurales, centros de acopio y cadena de frío es vista como “obra habilitadora” que impulsa todo el resto de la cadena productiva. El segundo lugar de la tecnificación del agua (Alt. 2) es coherente con la realidad hídrica nacional. La “Infraestructura agrícola” (Alt. 5) en tercer lugar confirma que, tras tecnología e insumos, los productores demandan de energía, conectividad y equipamiento para sostener la innovación.

La Encuesta 3 pidió priorizar cinco riesgos al desarrollo de la agricultura innovadora: alto costo de la tierra, falta de infraestructura, escasez de agua, costos elevados de producción y regulaciones ambientales estrictas. El análisis multicriterio identifica que el riesgo más crítico es “Regulaciones ambientales estrictas”, seguido de “Costos elevados de producción” y luego el bloque de riesgos estructurales (infraestructura deficiente, tierra e insumos). Este resultado revela que, además de las limitaciones físicas, los expertos productores perciben un grave “riesgo regulatorio” tal como se aprecia en la Figura 22.



Figura 22. Análisis de ponderación de pesos de encuesta número 3.

Fuente: Elaboración propia con software de análisis multicriterio.

Por lo tanto, las políticas públicas deben abordar no solo carencias de insumos o de infraestructura, sino también ajustar el marco regulatorio. Se requieren ventanillas únicas y lineamientos técnicos para los trámites ambientales y sanitarios, además de estándares y certificaciones diseñados para pequeños y medianos productores

4.3.2. Identificación de barreras y facilitadores

Los resultados cualitativos y cuantitativos ponen de manifiesto diversas barreras que dificultan la adopción de cultivos verticales en México. Entre las económicas se aprecia el elevado costo inicial de la infraestructura y tecnología requerida. Este factor tubo tanto la inversión en sistemas de iluminación LED, ventilación y riego como el alto consumo energético permanente. Junto a ello, se señalan barreras técnicas como la escasez de personal especializado y la falta de capacitación en agricultura bajo cubierta, dado que las universidades mexicanas en su mayoría aún no incorporan planes de estudio exhaustivos para formar especialistas en cultivos protegidos. Institucionalmente, existe una débil vinculación del sector público con la agricultura vertical, los programas gubernamentales tienden a privilegiar el maíz tradicional, manteniendo desatendida la innovación en sistemas controlados. Las barreras sociales también son relevantes, algunos consumidores y agricultores asocian erróneamente estos sistemas con el uso intensivo de agroquímicos o con prácticas “no naturales” cayendo de tal forma en la falacia naturista.

Frente a estos obstáculos, varios facilitadores emergen del campo tal como se aprecia en la Figura 23. Primero, la apertura tecnológica de pequeños productores y jóvenes emprendedores urbanos sugiere voluntad de innovar. En México existe ya experiencia en agricultura protegida que puede transferirse al contexto vertical. Otro facilitador es el interés por mercados locales, como pueden ser productores urbanos que valoran la posibilidad de llevar vegetales frescos, libres de agroquímicos y con alta calidad.

En conjunto, estas barreras y facilitadores condicionan fuertemente la efectividad de cualquier política pública. Por ejemplo, sin atender primero el alto costo de

inversión y la falta de capacitación técnica, incentivos financieros por sí solos difícilmente lograrán expandir el cultivo vertical.



Figura 23. Niveles de impactos por barrera.

Fuente: Elaboración propia con software de análisis multicriterio.

4.3.3. Propuestas de política pública y modelo de adopción tecnológica

A partir de los hallazgos, se propone un modelo de adopción tecnológica para el cultivo vertical de maíz enano en zonas urbanas y en fases de implementación escalonada. Este modelo parte de la premisa de que la modernización agrícola requiere un enfoque sistémico, por lo que requiere de la cooperación de los siguientes actores:

Participación coordinada del sector público, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural SADER, gobiernos estatales y municipales, instituciones de investigación y extensión (universidades agropecuarias, centros tecnológicos) productores (agricultores urbanos, cooperativas de huertos), empresas y emprendedores agroindustriales. Cada actor tiene un rol específico, el caso del gobierno debe liderar la definición de marcos normativos, las instituciones académicas se

encargan de generar conocimiento, los productores implementan los sistemas y validan la tecnología, y finalmente el sector privado provee equipamiento, financiamiento e innovación(Servicio de Información Agroalimentaria y pesca, 2023) .

El éxito de esta propuesta depende del alineamiento de varios factores. Primero, la voluntad política de los gobiernos, los cuales deben reconocer la agricultura vertical como infraestructura crítica urbana, la aceptación social y cultural, la cual debe comunicarse claramente el aporte ecológico. También es clave la adaptación tecnológica para si poder aprovechar la experiencia existente en invernaderos. Igualmente, la vinculación con la iniciativa privada asegura inversión de riesgo y escalabilidad de tal forma que funciones como una cadena de innovación tal como se aprecia en la Figura 24.



Figura 24. Línea de innovación propuesta.

Fuente: Elaboración propia.

4.3.4. Conclusiones generales del capítulo

El experimento del prototipo vertical de maíz enano permite demostrar que es técnicamente posible establecer sistemas de cultivo vertical para gramíneas bajo condiciones controladas, obteniendo ventajas importantes en el aprovechamiento del espacio, el control ambiental y la eficiencia en el uso del agua. Aunque durante el desarrollo se presentaron problemas relacionados con deficiencias nutrimentales, hongos y manejo hidráulico, las mejoras implementadas permitieron optimizar progresivamente el sistema, evidenciando que la agricultura vertical puede convertirse en una alternativa viable para la producción intensiva en entornos urbanos y periurbanos.

El análisis comparativo de costos basado en información de FIRA permite identificar que la producción convencional de maíz enfrenta un incremento constante en costos de producción asociados a insumos, agua y vulnerabilidad climática. En contraste, aunque el sistema vertical requiere una inversión inicial más elevada debido a infraestructura y tecnología, presenta ventajas potenciales relacionadas con la reducción del consumo hídrico, la posibilidad de múltiples ciclos de producción anuales y una mayor productividad por unidad de superficie, lo que podría mejorar su viabilidad económica a mediano y largo plazo.

Las entrevistas constituyeron un instrumento de recaudación de datos esencial para entender los enfoques de las personas, tanto en los económicos e institucionales que condicionan la adopción del cultivo vertical de maíz enano. Los resultados cualitativos que se presentan en las secciones siguientes ofrecieron evidencia directa de productores y técnicos que permiten generar recomendaciones prácticas y de política capaces de facilitar un escalamiento tecnológicamente viable y socialmente aceptable del modelo propuesto.

5. CONCLUSIONES

Los resultados implican beneficios ambientales importantes de la agricultura vertical. El sistema hidropónico cerrado evita lixiviación de fertilizantes y reduce la contaminación hídrica. Esto concuerda con Pennisi (Pennisi et al., 2025a), quien destaca la alta eficiencia hídrica y la estandarización productiva que permite sustentar cultivos todo el año. Se considera que la alta eficiencia en el uso del agua se traduce en menor escorrentía y mayor sostenibilidad, tal como lo documenta la investigación de Hernández (Hernández et al., 2021) .

Además, la precocidad inducida por el control climático incrementa la producción anual total: nuestro maíz enano creció más rápido y en más ciclos, repitiendo el hallazgo de Ling (Ling & Altland, 2025) sobre la producción acelerada en entornos protegidos. Aunque se aprecia unas reducciones drásticas en el uso de suelo cultivable, algunos autores advierten que esta ganancia de suelo se compensa con altos consumos energéticos (alumbrado y climatización). Aun así, la posibilidad de cultivar cerca de centros urbanos (Pennisi et al., 2025a) abre la puerta a huertos verticales de ciclo continuo que suministran alimentos frescos sin competir directamente por tierras agrícolas.

5.1. Aplicaciones económicas y sociales

Desde el punto de vista social y económico, el cultivo vertical de maíz enano podría fortalecer la seguridad alimentaria local. Esto coincide con estudios que afirman que la producción de vegetales en ambientes controlados facilita el abastecimiento en mercados urbanos y reduce la dependencia de insumos importados. Además, el carácter orgánico del cultivo hidropónico representa un beneficio en salud pública, como indica Ling en su investigación (Ling & Altland, 2025) al mencionar cultivos más seguros para el consumidor. Sin embargo, se observa que la implementación requiere mano de obra especializada y mayor inversión.

En este sentido, otros autores resaltan la necesidad de capacitación técnica para aprovechar al máximo la tecnología, coincidiendo con la conclusión de impulsar

la formación agrícola. Además de que la flexibilidad de ubicar granjas verticales promueve huertos comunitarios urbanos y empleo local (de Anda & Shear, 2017) , mientras que otros advierten que los modelos de negocio deben resolverse antes de su amplia adopción(Herrera-Sánchez, 2025) .

En resumen, las conclusiones confirman que la agricultura vertical presenta ventajas productivas y ambientales claras en los términos de rendimientos elevados, ahorro de agua y suelo, junto a oportunidades socioeconómicas para zonas urbanas. Estas ventajas coinciden con lo señalado por Pennisi (Pennisi et al., 2025) aunque se reconoce que los costos energéticos y tecnológicos son una limitante importante. En síntesis, los beneficios observados refuerzan la viabilidad del cultivo vertical de maíz enano para contextos urbanos, especialmente si se combinan con fuentes de energía renovable, tal como recomiendan recientes autores.

5.2.Limitaciones del estudio

La ejecución del cultivo vertical hidropónico de maíz enano reveló varias limitaciones técnicas. Inicialmente, se registraron fallas en el sistema de riego (por ejemplo, fugas en tuberías o mal funcionamiento de la bomba de recirculación) que afectaron la uniformidad de la irrigación. Las fugas en las tuberías son las principales causas de pérdida de presión en sistemas de riego presurizado, generando variaciones de presión que afectan directamente la distribución uniforme del agua, al contar con tuberías de 90 grados y tuberías que terminan en un tapón provoca una alta presión la cual provoca que los tubos Policloruro de vinilo (PVC) se despeguen y las mangueras se rompan.

También surgieron problemas fitosanitarios asociados con la alta humedad del invernadero, propicia para enfermedades fúngicas (Belchim, 2024). El botritis y el mildiu son enfermedades fúngicas comunes en invernaderos bajo alta humedad relativa, especialmente en condiciones de invernadero donde las temperaturas oscilan entre 18 a 25 °C, estos patógenos se propagan rápidamente en entornos con humedad elevada, constituyendo un riesgo importante para la viabilidad del cultivo, al presentarse problemas de absorción

de nutrientes en las plantas se decidió concentrar la solución nutritiva pero al no haber un efecto en las plantas se decidió aumentar la cantidad de riego por hora, lo que provocó la proliferación de botritis y mildiu.

Como se había comentado en el párrafo anterior, fue necesario ajustar con frecuencia la formulación de la solución nutritiva (pH y concentración de sales) para compensar cambios en la demanda de nutrientes de las plantas. La precisión en la formulación de soluciones nutritivas es crucial para el desarrollo óptimo del cultivo (Groves et al., 2009). El rango óptimo de pH para la mayoría de los cultivos hidropónicos está entre 5.5 y 6.5, donde los nutrientes son más solubles y las raíces los absorben más fácilmente. Asimismo, la conductividad eléctrica debe mantenerse generalmente entre 1 y 3 ms/cm, aunque este valor varía según el tipo de cultivo y su etapa de desarrollo. Las fluctuaciones en pH se deben a cambios en la composición química de la solución, donde el exceso de ciertos nutrientes como nitratos puede aumentar el pH, mientras que la acumulación de otros como sulfatos o fosfatos puede disminuirlo (Touliatos et al., 2016).

Finalmente, la infraestructura del prototipo presentó restricciones lo que impuso limitaciones operativas al sistema de riego y control ambiental debido al no contar con un estándar o manual de las necesidades del cultivo en vertical. Los sistemas de invernadero automatizados y enfocados a un estándar pueden mejorar la productividad, esto con ayuda de sensores y control climático inteligente, sin embargo al no contar con un estándar definido se optó por cambiar y modificar las estructuras y sensores establecidos con el fin de encontrar una metodología apropiada al cultivo, tal intervención provocó desequilibrios en el invernadero y sus sistemas, tales que son esenciales para mantener condiciones óptimas y sin dependencia de supervisión humana continua. La automatización limitada restringe la capacidad del prototipo para realizar ajustes en tiempo real basados en datos precisos de variables ambientales como temperatura, humedad y concentración de nutrientes, por lo que para este primer ciclo se considera como un trabajo artesanal, todo fue realizado y medido al día, por lo

que los cambios fueron realizados en base a las incidencias ocurridas y recurriendo a bibliografía teoría sobre cómo solucionarla.

La duración del ciclo experimental fue acotada, impidiendo la evaluación de etapas finales de desarrollo y el rendimiento total del cultivo. El ciclo completo del cultivo de maíz, desde la siembra hasta la cosecha, suele durar entre 70 y 120 días, dividido en fases vegetativa y reproductiva. La fase reproductiva, particularmente entre los 60 y 100 días, es crítica para el llenado de la mazorca y el desarrollo final del grano, con un experimento de duración acotada se puede evaluar completamente estas etapas críticas, pero a su vez se deja a un lado la investigación de efectos postcosecha en los sistemas verticales.

El experimento contó con un número reducido de plantas, lo que limita la representatividad estadística de los resultados. En experimentos agrícolas, el número de plantas evaluadas determina la precisión de las estimaciones estadísticas (Falagas et al., 2008). Para obtener mayor precisión se requieren tamaños de muestra considerablemente mayores, por el contrario, muestras reducidas generan intervalos de confianza más amplios, afectando la confiabilidad de las conclusiones (Sandelowski & Barroso, 2006). El experimento se llevó a cabo únicamente en un invernadero de Texcoco, Estado de México a 2250 m de altitud, con un clima templado, aunque a pesar de que en el lugar de estudio se presentan condiciones agroclimáticas particulares, estas condiciones pueden diferir significativamente de otros entornos agrícolas. La validación de sistemas agrícolas requiere pruebas en múltiples agroecosistemas y escalas de producción para garantizar la aplicabilidad de los hallazgos. Sin validación en distintos climas ni a escalas de producción mayores, la aplicabilidad de los hallazgos a contextos más amplios queda por confirmarse, ya que cada región climatológica presenta particularidades climáticas, edáficas y de manejo que pueden modificar significativamente los resultados (Benke & Tomkins, 2017).

5.3.Recomendaciones para futuras investigaciones

Para optimizar el sistema técnico se propone mejorar el riego mediante fertirriego de precisión y refinar la iluminación con luces LED de espectro completo, regulables por etapa de crecimiento junto con una solución nutritiva balanceada para el maíz. Además, conviene incrementar la automatización del invernadero con control climático inteligente que ajuste en tiempo real variables como temperatura, humedad y CO₂. Se recomienda también replicar el estudio en distintos contextos agroclimáticos y escalas productivas usando diversas variedades de maíz para validar la adaptabilidad del diseño y ajustar parámetros locales. Además de que es recomendable el replicar el experimento en diversos climas con el fin de evaluar la factibilidad en otros ambientes.

Finalmente, es clave integrar un análisis de viabilidad económica exhaustivo a largo plazo y considerar la sostenibilidad energética. Debido a las limitaciones la instrucción como agrónomo es realizar un estudio financiero mucho más exhaustivo y completo que compare los costos iniciales y operativos con los ingresos proyectados por ciclos anuales. Estudios comparativos indican que los sistemas verticales hidropónicos son muy intensivos en energía, diversos autores encontraron que la producción hidropónica de lechuga requiere 82 veces más energía por kg que el cultivo convencional, a cambio de un rendimiento 11 veces mayor. Para atenuar este reto se recomienda incorporar fuentes renovables como paneles solares y medidas de eficiencia de recursos eléctricos, esto debido a que los altos costos iniciales y el consumo energético son limitantes de la hidroponía urbana, de modo que su éxito dependerá de políticas de apoyo como los subsidios e incentivos que mejoren su viabilidad económica.

6. LITERATURA CITADA

- Al-Chalabi, M. (2015). Vertical farming: Skyscraper sustainability? *Sustainable Cities and Society*, 18, 74–77.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.06.003>
- sustainability? *Sustainable Cities and Society*, 18, 74–77.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.06.003>
- Al-Kodmany, K. (2018). The vertical farm: A review of developments and implications for the vertical city. *Buildings*, 8(2), 24.
<https://doi.org/10.3390/buildings8020024>
- Banerjee, C., & Adenaeuer, L. (2014). Vertical farming: The only way is up? *Journal of Agricultural Studies*, 2(1), 40.
<https://doi.org/10.5296/jas.v2i1.5486>
- Beacham, A. M., Vickers, L. H., & Monaghan, J. M. (2019). Vertical farming: A summary of approaches to growing skywards. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 94(3), 277–283. <https://doi.org/10.1080/14620316.2019.1574214>
- Belchim, C. (2024). Certis Biologicals y Certis Belchim presentan un nuevo biofungicida de tratamiento de semillas para productores de cereales. *AgriBusiness Global*.
<https://www.agribusinessglobal.com/es/author/certis-belchim/>
- Benke, K., & Tomkins, B. (2017). Future food-production systems: Vertical farming and controlled-environment agriculture. *Sustainability: Science, Practice and Policy*, 13(1), 13–26.
<https://doi.org/10.1080/15487733.2017.1394054>

- Berrang-Ford, L., Pearce, T., & Ford, J. D. (2015). Systematic review approaches for climate change adaptation research. *Regional Environmental Change*, 15(5), 755–769.
<https://doi.org/10.1007/s10113-014-0708-7>
- Birkby, J. (2016). Vertical farming. In *ATTRA Sustainable Agriculture Program, National Center for Appropriate Technology*.
<https://attra.ncat.org/publication/vertical-farming/>
- Bongiovanni, R., & Lowenberg-DeBoer, J. (2004). Precision agriculture and sustainability. *Precision Agriculture*, 5(4), 359–387. <https://doi.org/10.1023/B:PRAG.0000040806.39604.aa>
- Booth, A., Sutton, A., & Papaioannou, D. (2016). *Systematic approaches to a successful literature review (2nd ed.)*. SAGE Publications.
- Carbajal, B. (2024). Reporta el GCMA cifra histórica en las importaciones de maíz. *La Jornada*, 23.
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2017). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches (5th ed.)*. SAGE Publications.
- de Anda, J., & Shear, H. (2017). Potential of vertical hydroponic agriculture in Mexico. *Sustainability*, 9(1), 140.
<https://doi.org/10.3390/su9010140>
- Delgado, R., & Sánchez, M. (2019). Efectos del monocultivo en la agricultura de América Latina. *Agronomía Sustentable*, 15(3), 25–37.

- Despommier, D. (2010). *The vertical farm: Feeding the world in the 21st century*. Thomas Dunne Books.
- Despommier, D. (2013). Farming up the city: The rise of urban vertical farms. *Trends in Biotechnology*, 31(7), 388–389.
<https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2013.03.008>
- Diamandis, P. H., & Kotler, S. (2021). *El futuro va más rápido de lo que crees: Cómo la convergencia tecnológica está transformando las empresas, la economía y nuestras vidas* (Ed. Kindle). Deusto.
- Enciso L., A. (2021). Se disparó el precio del maíz desde inicios de la pandemia. *La Jornada*.
<https://www.jornada.com.mx/notas/2021/12/13/politica/se-disparo-el-precio-del-maiz-desde-inicios-de-la-pandemia/>
- Etikan, I., Musa, S. A., & Alkassim, R. S. (2016). Comparison of convenience sampling and purposive sampling. *American Journal of Theoretical and Applied Statistics*, 5(1), 1–4.
<https://doi.org/10.11648/j.ajtas.20160501.11>
- Falagas, M. E., Pitsouni, E. I., Malietzis, G. A., & Pappas, G. (2008). Comparison of PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar: Strengths and weaknesses. *The FASEB Journal*, 22(2), 338–342. <https://doi.org/10.1096/fj.07-9492lsf>
- Fideicomisos Instituidos en Relación con la agricultura. (2024). *Panorama agroalimentario: Maíz 2025*. Banco de México.

- Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., & Zaks, D. P. M. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478(7369), 337–342. <https://doi.org/10.1038/nature10452>
- García, A., López, R., & Martínez, P. (2020). Innovaciones en agricultura protegida: Casos de éxito en México. *Revista de Agricultura Sostenible*, 12(4), 45–58.
- García, F., López, S., & Rivera, M. (2021). Innovations in precision agriculture: The use of drones for monitoring crops. *Agricultural Technologies Journal*, 15(3), 45–60.
- Godfray, H. C. J., Beddington, J. R., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., & Toulmin, C. (2010). Food security: The challenge of feeding 9 billion people. *Science*, 327(5967), 812–818. <https://doi.org/10.1126/science.1185383>
- Groves, R. M., Fowler, F. J., Couper, M. P., Lepkowski, J. M., Singer, E., & Tourangeau, R. (2009). *Survey methodology* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Hernández, J., & García, A. (2020). Impacto del cambio climático en la agricultura de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(2), 345–357.
- Hernández, J., Pérez, L., & Morales, T. (2021). Aplicación de tecnologías en invernaderos de Baja California: Eficiencia hídrica y productividad. *Tecnología Agrícola Mexicana*, 8(3), 23–39.

- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación (6a ed.)*. McGraw-Hill.
- Herrera-Sánchez, D. J. (2025). Eficiencia de los sistemas de cultivo hidropónico en entornos urbanos. *Revista Científica Ciencia y Método*, 3(2), 15–29. <https://doi.org/10.55813/gaea/rcym/v3/n2/2>
- Industrializado, C. N. del M. (2023). *Posicionamiento de la Cámara Nacional del Maíz Industrializado sobre la producción y abasto de maíz amarillo*. CANAMI.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2023). *Censo agropecuario 2022: Resultados definitivos*. INEGI.
- Kalantari, F., Mohd Tahir, O., Mahmoudi Lahijani, A., & Kalantari, S. (2017). A review of vertical farming technology: A guide for implementation of building integrated agriculture in cities. *Advanced Engineering Forum*, 24, 76–91.
- Kalantari, F., Tahir, O., Joni, R. A., & Fatemi, E. (2017). Opportunities and challenges in sustainability of vertical farming: A review. *Journal of Landscape Ecology*, 10(2), 15–30. <https://doi.org/10.1515/jlecol-2017-0009>
- Khanal, A., Milics, G., Kovács, Z., & Pradhan, N. R. (2020). Comparative performance of maize in raised bed and furrow irrigation techniques with respect to water productivity and yield. *Agricultural Water Management*, 231, 106022.

- Kitzinger, J. (1995). Qualitative research: Introducing focus groups. *BMJ*, 311(7000), 299–302.
<https://doi.org/10.1136/bmj.311.7000.299>
- Kozai, T., Niu, G., & Takagaki, M. (2019). *Plant factory: An indoor vertical farming system for efficient quality food production*. Academic Press.
- Li, L., Zhang, L., & Wang, X. (2024). Research on the dynamic evaluation of the competitiveness of listed seed enterprises in China. *Agriculture*, 14(8), 1213.
<https://doi.org/10.3390/agriculture14081213>
- Ling, K.-S., & Altland, J. (2025). Vertical Farming - No Longer a Futuristic Concept. In *Under the Microscope: Zooming in on Agriculture's Biggest Challenges*. Servicio de Investigación Agrícola del USDA. <https://www.ars.usda.gov/oc/utm/vertical-farming-no-longer-a-futuristic-concept/>
- Lipper, L., McCarthy, N., Zilberman, D., Asfaw, S., & Branca, G. (Eds.). (2018). *Climate smart agriculture: Building resilience to climate change*. Springer.
- López, P. (2020). El impacto económico de la dependencia agrícola en México. *Economía Rural*, 18(1), 45–61.
- Martínez, L., & Gómez, F. (2021). La degradación del suelo como factor limitante en la producción agrícola. *Journal of Soil Studies*, 9(4), 121–133.

- NEIKER. (2024). NEIKER promueve los cultivos verticales de plantas aromáticas. *Phytoma*.
<https://phytoma.com/noticias/noticias-de-actualidad/neiker-promueve-los-cultivos-verticales-de-plantas-aromaticas>
- Peña-Reyes, E. (2016). *Evaluación de híbridos de maíz semi-enanos y convencionales*.
- Pennisi, G., Gianquinto, G., Marcelis, L. F. M., Martin, M., & Orsini, F. (2025). Vertical farming: productivity, environmental impact, and resource use - a review. *Agronomy for Sustainable*.
- Puyana, A., & Romero, J. (2016). Dependencia de México a las importaciones de maíz en la era del TLCAN. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(1), 115–126.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v7i1.375>
- Rajasegar, M. (2023). Optimización de sistemas hidropónicos NFT en agricultura vertical. *Revista de Horticultura Sustentable*, 45(3), 50–62.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin III, F. S., Lambin, E., & Foley, J. (2009). Planetary boundaries: Exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society*, 14(2), 32. <https://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/>
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2023). *Expectativas de producción agroalimentaria 2023*.

- SAGARPA. (2017). *Maíz grano blanco y amarillo mexicano*.
Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y
Alimentación.
- Sandelowski, M., & Barroso, J. (2006). *Handbook for synthesizing
qualitative research*. Springer Publishing Company.
- See, M. T. (2024). Current status and future trends for pork
production in the United States of America and Canada. *Animal
Bioscience*, 37, 775–785. <https://doi.org/10.5713/ab.24.0055>
- Servicio de Información Agroalimentaria y pesca. (2023). *Panorama
agroalimentario 2023*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo
Rural. <https://nube.agricultura.gob.mx/s/otgZD2GKGcgLX3B>
- Specht, K. (2014). Urban agriculture of the future: An overview of
sustainability aspects of food production in and on buildings.
Agriculture and Human Values, 31(1), 33–51.
- Tilman, D., Clark, M., Williams, D. R., Kimmel, K., Polasky, S., &
Packer, C. (2017). Future threats to biodiversity and pathways to
their prevention. *Nature*, 546(7656), 73–81.
<https://doi.org/10.1038/nature22900>
- Touliatos, D., Dodd, I. C., & McAinsh, M. (2016). Vertical farming
increases lettuce yield per unit area compared to conventional
horizontal hydroponics. *Food and Energy Security*, 5(3), 184–
191. <https://doi.org/10.1002/fes3.83>

- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Big data in smart farming: A review. *Agricultural Systems*, 153, 69–80.
<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>
- Zepeda, C. (2024). Los productos agropecuarios han subido tres veces más que la inflación. *La Jornada*.
<https://www.jornada.com.mx/noticia/2024/07/15/economia/los-productos-agropecuarios-han-subido-tres-veces-mas-que-la-inflacion-5281/>
- Zepeda, J. (2017). *Formación de una población de maíz enano adaptada al bajío mexicano*. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.