

Noviembre, 2025



BUAP



Ciencias Ambientales
Posgrado

Autonomía energética del huerto urbano familiar, con base en integral térmica, para la **producción sustentable** de alimentos vegetales en Puebla

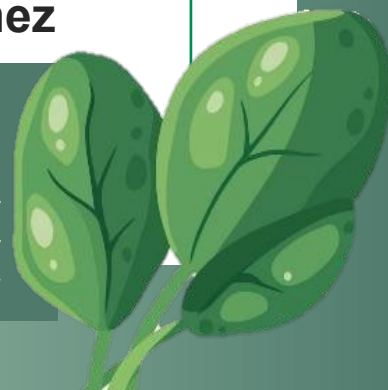


Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Instituto de Ciencias | Posgrado en Ciencias Ambientales:
Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable

Tesis presentada para obtener el grado de:
Doctorado en Ciencias Ambientales

Presenta:
Elimelec Muñoz Nuñez

DR. MANUEL HUERTA LARA - DIRECTOR
DR. OMAR ROMERO ARENAS - CODIRECTOR
DR. RICARDO MUNGUÍA PÉREZ - TUTOR
DR. MIGUEL ÁNGEL GONZÁLEZ FUENTES - INTEGRANTE
DR. ROLANDO RUEDA LUNA - INTEGRANTE
DRA. SONIA EMILIA SILVA GÓMEZ - INTEGRANTE



AGRADECIMIENTOS

A mi esposa e hijos, por su amor, paciencia y constante admiración, que me impulsaron en cada etapa de este proceso.

A mis padres y hermanos, por su apoyo incondicional, sus oraciones y el aliento moral y espiritual que me sostuvieron en los momentos más desafiantes.

A mi padre, en particular, por motivarme a no desistir, por animarme a esforzarme siempre un poco más y por recordarme con sus palabras sencillas que se puede salir adelante.

Al Dr. Manuel Huerta Lara, por creer firmemente en mi potencial académico incluso cuando otros dudaban, y por alentarme siempre a ir más allá en la investigación.

Al Dr. Omar Romero Arenas, por sus observaciones meticulosas, su seguimiento incansable incluso de madrugada, y su firme compromiso para que mi artículo científico alcanzara el nivel requerido para su publicación.

A mis profesores, de quienes aprendí más de lo que cualquier aula puede ofrecer, y a mi comité tutorial, por su guía académica, compromiso y acompañamiento a lo largo de esta investigación.

Y finalmente, al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), por el respaldo financiero que hizo posible esta etapa formativa. A cada uno de ustedes gracias por ser parte de mi formación.

“Porque Jehová da la sabiduría, Y de su boca viene el conocimiento y la inteligencia.”

Proverbios 2:6



Palabras clave: Alimentos vegetales, Seguridad alimentaria, Huertos Urbanos, Integral Térmica y grados días de desarrollo, Producción Sustentable de Vegetales, Inocuidad de alimentos vegetales, Emergía y Transformicidad, Huertos urbanos en la Ciudad de Puebla.



RESUMEN	7
INTRODUCCIÓN	8
CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
1.1 Justificación.....	10
1.2 Formulación del problema de investigación	13
1.3 Preguntas de investigación	14
1.4 Hipótesis.....	15
1.4.1 Hipótesis general	15
1.4.2 Hipótesis específicas.....	15
1.5 Objetivos	16
1.5.1 Objetivo general	16
1.5.2 Objetivos específicos.....	16
CAPÍTULO 2. MARCO DE REFERENCIA	17
2.1 Marco teórico	17
2.1.1 Antecedentes históricos de la agricultura urbana	17
2.1.2 Alimentos vegetales y seguridad alimentaria	22
2.1.3 Huertos urbanos y producción sustentable de vegetales	30
2.1.4 Inocuidad de alimentos vegetales	37
2.1.5 Análisis económico en sistemas productivos	45
2.1.6 Integral térmica y grados-día de desarrollo	48
2.1.7 Emergía y transformicidad en agroecosistemas urbanos.....	54
2.1.8 Fronteras estocásticas de producción (SFA)	62
2.1.9 Huertos urbanos en la ciudad de Puebla.....	68
2.2 Marco legal y normativo	74
2.2.1 Lineamientos para el funcionamiento del programa de huertos urbanos familiares en Puebla.....	74
2.2.2 Ley de Agricultura Urbana para el Estado de Puebla (2013).....	75
2.2.3 Iniciativa de reforma a la Ley de Desarrollo Social en Puebla (2025).....	76
2.2.4 Ley de Huertos Urbanos de la Ciudad de México (2017)	77
2.2.5 Ley de Desarrollo Rural Sustentable (2001, reforma 2024).....	77
2.2.6 Objetivos de Desarrollo Sostenible 2030 (ONU).....	78
2.2.7 Convenciones internacionales relevantes: Desertificación, Cambio Climático, y Estocolmo	79
2.2.8 Concepto jurídico de autonomía aplicada al agroecosistema urbano.....	81
2.2.9 Agroecología en el marco normativo	82



2.3 Marco conceptual	82
2.3.1 Componentes del agroecosistema huerto urbano familiar.....	84
2.3.2 Relaciones entre los componentes del agroecosistema y factores de sustentabilidad	93
2.3.3 Modelo conceptual integrado SFA–Emergía–Integral térmica	98
2.3.4 Teoría del trabajo de investigación.....	100
2.3.5 Paradigma y enfoque epistemológico.....	101
2.3.6 Tipo de investigación.....	102
2.3.7 Estado del arte de la investigación	103
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	105
3.1 Localización y zona de estudio	105
3.2 Diseño de la investigación	107
3.2.1 Diseño metodológico.....	107
3.2.2 Tipo de investigación.....	108
3.2.3 Enfoque mixto	108
3.2.4 Diseño de caso múltiple y estructura jerárquica.....	109
3.3 Implementación del experimento	110
3.3.1 Establecimiento de huertos urbanos familiares	110
3.3.2 Diseño y dimensiones de las parcelas experimentales	110
3.3.3 Contenedores y formulación del sustrato	111
3.3.4 Selección de especies hortícolas.....	111
3.3.5 Manejo agroecológico	111
3.3.6 Monitoreo climático e integral térmica	114
3.3.7 Inventario de insumos y flujos emergéticos	115
3.3.8 Registro de variables productivas.....	115
3.3.9 Encuesta socioambiental sobre saberes familiares	116
3.4 Variables de respuesta.....	117
3.4.1 Producción y rendimiento agronómico.....	117
3.4.2 Eficiencia térmica y aprovechamiento climático.....	118
3.4.3 Autonomía emergética y sostenibilidad energética	119
3.4.4 Eficiencia técnica y optimización productiva.....	119
3.4.5 Variables de sustentabilidad integral del sistema	121
3.5 Preparación y construcción del dataset analítico.....	122
3.5.1 Consolidación y validación de datos experimentales	122
3.5.2 Preparación para análisis emergético	123



3.5.3 Preparación para modelado de frontera estocástica.....	125
3.5.4 Control de calidad estadística y limitaciones	126
3.6 Métodos de análisis estadístico	127
3.6.1 Análisis descriptivo y exploratorio.....	127
3.6.2 Modelado de frontera estocástica de producción	128
3.6.3 Evaluación integral de sostenibilidad.....	129
3.7 Especificación completa del modelo SFA	130
3.7.1 Modelo y determinantes de la ineficiencia.....	130
3.7.2 Software y paquetes utilizados	132
3.7.3 Valores unitarios de emergía (UEV)	132
3.7.4 Convergencia y diagnósticos.....	132
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	133
4.1 Saberes familiares y barreras percibidas	133
4.2 Caracterización productiva de huertos urbanos familiares	135
4.2.1 Rendimiento y biomasa por especie	135
4.2.2 Desempeño comparativo entre especies hortícolas	138
4.2.3 Productividad del sistema integrado.....	138
4.3 Eficiencia térmica y aprovechamiento climático	140
4.3.1 Integral térmica acumulada por especie	140
4.3.2 Eficiencia en el aprovechamiento térmico.....	146
4.3.3 Variabilidad climática y respuesta productiva.....	147
4.4 Evaluación emergética y autonomía energética	148
4.4.1 Estructura energética del sistema	148
4.4.2 Indicadores de sostenibilidad emergética.....	150
4.4.3 Autonomía emergética del huerto urbano familiar.....	153
4.5 Eficiencia técnica mediante frontera estocástica.....	157
4.5.1 Estimación del modelo SFA y parámetros	157
4.5.2 Eficiencias técnicas individuales.....	159
4.5.3 Efectos de determinantes ambientales.....	161
4.6 Síntesis de sostenibilidad integral	166
4.6.1 Integración multidimensional de resultados	166
4.6.2 Validación de hipótesis de investigación.....	169
4.6.3 Viabilidad del modelo de huerto urbano familiar.....	170



CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	172
5.1 Conclusiones por objetivo específico.....	172
5.2 Respuesta a las preguntas de investigación.....	176
5.3 Contribuciones científicas y metodológicas.....	179
5.4 Implicaciones para políticas públicas.....	181
5.5 Limitaciones del estudio.....	182
5.6 Líneas futuras de investigación.....	184
LITERATURA CITADA	188
ANEXOS	212
Tablas de datos experimentales.....	212
Diagramas de flujos energéticos (emergía).....	216



RESUMEN

La presente tesis doctoral analiza la producción sustentable de alimentos vegetales en huertos urbanos familiares de Puebla mediante un modelo innovador que integra la emergía, la integral térmica y un análisis de fronteras estocásticas de producción (SFA). Esta implementación permite evaluar de manera conjunta la eficiencia energética, la disponibilidad climática y el desempeño técnico de los sistemas agroecológicos urbanos, superando las limitaciones de enfoques tradicionales como el análisis costo-beneficio (Odum, 1996; McMaster & Wilhelm, 1997; Battese & Coelli, 1995; Boardman et al., 2018). La investigación busca identificar los factores socioambientales y biofísicos que determinan la autonomía productiva de estos sistemas, en un contexto donde la inseguridad alimentaria urbana afecta a millones de personas en el mundo (FSIN & Global Network Against Food Crises, 2023). Además, plantea una propuesta metodológica novedosa que integra herramientas energéticas, climáticas y econométricas en un mismo marco analítico, aportando una visión holística de la sustentabilidad urbana.

Los resultados esperados pretenden demostrar que los huertos urbanos no solo son espacios de producción alimentaria, sino también mecanismos de resiliencia y seguridad alimentaria, al reducir la dependencia de cadenas externas y fortalecer la autonomía energética y técnica de las familias urbanas (Warren et al., 2015; Holt & Altieri, 2013; Langemeyer et al., 2021). La innovación de este trabajo radica en ofrecer un modelo replicable que integra emergía, grados-día de desarrollo y análisis estocástico, aportando evidencias para el diseño de políticas públicas y estrategias de desarrollo urbano sustentable en el marco de la Agenda 2030 (Nicholls et al., 2020; Lovell, 2010; Villavicencio-Valdez et al., 2023). De esta manera, la investigación contribuye tanto al fortalecimiento del conocimiento científico en agroecología urbana como a la construcción de soluciones prácticas que respondan a los retos ambientales, sociales y económicos de las ciudades intermedias mexicanas.



INTRODUCCIÓN

La producción sustentable de alimentos vegetales en ambientes urbanos constituye una estrategia cada vez más relevante para mejorar la calidad de vida de la población (Tornaghi, 2014; Nogueira-McRae et al., 2018), especialmente en contextos de pandemias y variabilidad climática (Lal, 2020; Pulighe & Lupia, 2020). Esta relevancia se alinea con la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de la ONU, que establece objetivos para lograr la seguridad alimentaria, promover la agricultura sostenible y garantizar bienestar para todos (Nicholls et al., 2020; Orsini et al., 2013). En este contexto global, el presente estudio conecta estas metas internacionales con la evaluación empírica de huertos urbanos familiares en Puebla, donde los huertos emergen como herramientas multifuncionales para enfrentar aislamiento social, fortalecer la interacción familiar y reducir el estrés (Sofo & Sofo, 2020; Theodorou et al., 2021), al mismo tiempo que contribuyen a una gestión sustentable de los recursos naturales (Langemeyer et al., 2021; Khan et al., 2022).

No obstante, alcanzar la sustentabilidad y autonomía de los huertos urbanos exige abordar desafíos técnicos, socioambientales y económicos (Yuan et al., 2022; McDougall et al., 2019), que afectan la eficiencia energética, la gestión ambiental y la regulación térmica del sistema (Yuan et al., 2023; Langemeyer et al., 2021). Por ello, esta tesis doctoral analiza la autonomía del agroecosistema huerto urbano en Puebla mediante tres enfoques: análisis emergético (McDougall et al., 2019; Yuan et al., 2023), integral térmica (Elnesr et al., 2016), integrados en un modelo de frontera estocástica de producción (Battese & Coelli, 1992; Oumer et al., 2022). Este modelo permite estimar la eficiencia técnica y analizar cómo interactúan los insumos energéticos, climáticos y sociales en la producción sustentable de alimentos (Muñoz-Nuñez et al., 2025).

En particular, esta investigación se enfoca en identificar los factores que influyen en la sostenibilidad y autonomía del huerto urbano, desde lo socioambiental y lo técnico, así como en la eficiencia productiva con implicaciones económicas indirectas evaluada a través del análisis



energético y de la frontera estocástica de producción (Langemeyer et al., 2021; Guzmán-Fernández et al., 2020). La metodología combina la síntesis energética para calcular el índice de producción y el índice de carga ambiental (McDougall et al., 2019) con el análisis de grados-día de desarrollo para la evaluación térmica (Elnesr et al., 2016).

La revisión de la literatura evidencia la ausencia de estudios integrales sobre sustentabilidad de huertos urbanos familiares en ciudades intermedias mexicanas, abordando interdisciplinariamente eficiencia energética, productividad agronómica y viabilidad económica (Guzmán-Fernández et al., 2020; Villavicencio-Valdez et al., 2023). Atendiendo a esta brecha, la presente investigación se posiciona como un estudio innovador de enfoque mixto que incorpora energía, integral térmica, grados-día de desarrollo, e inocuidad (Pantoja-Calderón et al., 2025). Esta brecha justifica el diseño de un modelo que articule enfoques energéticos, térmicos y productivos en un solo marco analítico.

El potencial de esta investigación es contribuir al conocimiento sobre agroecosistemas urbanos y proveer un modelo replicable para otras ciudades interesadas en impulsar la producción sustentable de alimentos vegetales. En este contexto, el objetivo general es analizar la autonomía productiva sustentable de los huertos urbanos familiares en Puebla, mediante un modelo de frontera estocástica que integre integral térmica, energía e insumos socioambientales, con el fin de estimar su capacidad real de producción sustentable (Muñoz-Nuñez et al., 2025).



CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Justificación

En México, la alimentación ha estado históricamente vinculada a cultivos nativos como maíz, chile, jitomate y calabaza (Moctezuma et al., 2015). Sin embargo, en el siglo XXI el sector agrícola enfrenta desafíos sin precedentes derivados de las variaciones térmicas y condiciones ambientales extremas, así como de la presión demográfica, que afectan la producción y la seguridad alimentaria (Estrada et al., 2022). Las variaciones térmicas extremas impactan negativamente los rendimientos de cultivos esenciales, acarreando pérdidas económicas significativas, mientras que el crecimiento demográfico proyectado exige una expansión considerable de la producción agrícola para satisfacer la demanda futura, lo que subraya la urgencia de desarrollar modelos alternativos de producción más equitativos, resilientes y accesibles desde las zonas urbanas (Estrada et al., 2022; Ballesteros, 2022).

Durante las últimas décadas, el modelo agrícola en México ha experimentado transformaciones profundas, pasando de un periodo de crecimiento sostenido a mediados del siglo XX a enfrentar, desde los años ochenta, los efectos de políticas neoliberales que incrementaron la dependencia de importaciones (Estrada et al., 2022; PAN, 2024). Esta evolución ha colocado a la agricultura en una posición de vulnerabilidad frente a tensiones de mercado y climáticas (Estrada et al., 2022). En consecuencia, los problemas de insuficiencia alimentaria y el alza de precios han reavivado el debate sobre autosuficiencia, en un contexto donde alrededor de 250 millones de personas enfrentaron inseguridad alimentaria aguda en 2022 (FSIN & Global Network Against Food Crises, 2023).

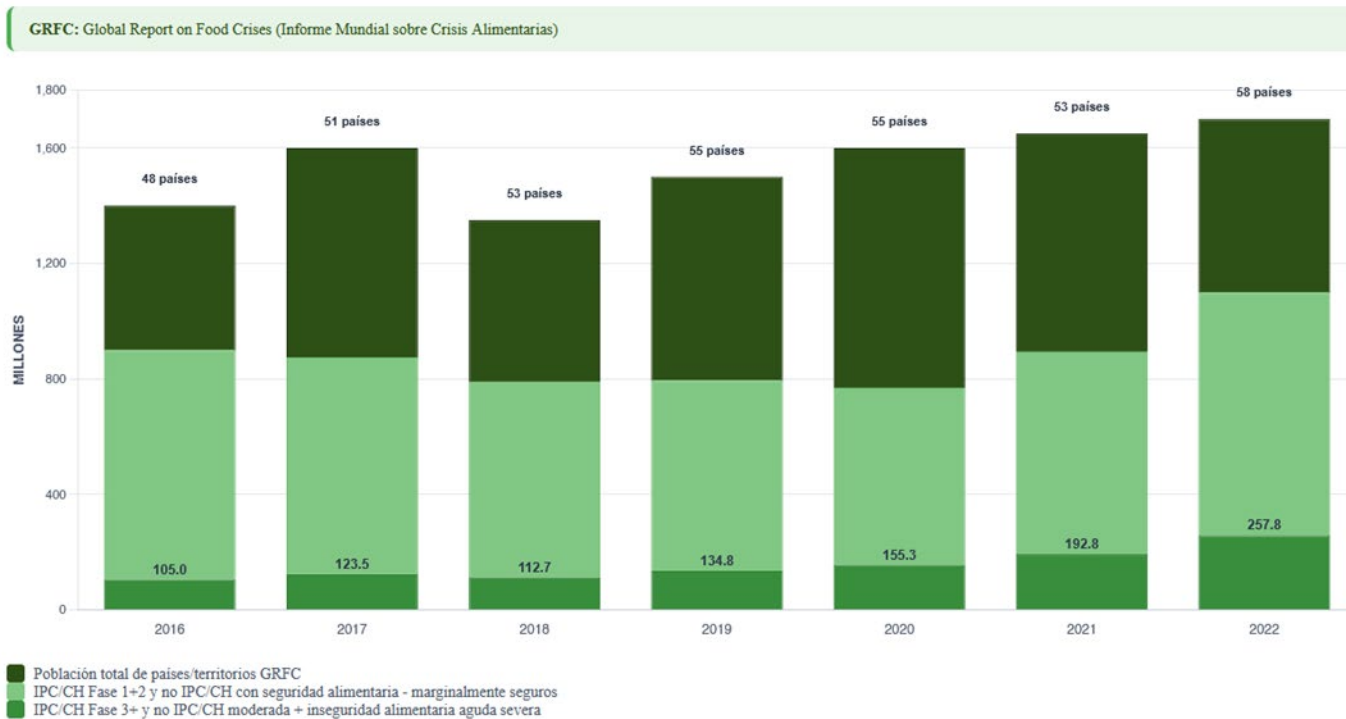
Como se observa en la Figura 1, la tendencia de personas afectadas por inseguridad alimentaria aguda ha ido en aumento constante desde 2016, evidenciando una problemática global persistente que requiere soluciones integrales, especialmente en contextos urbanos vulnerables



como el mexicano. Esta preocupación es especialmente relevante en México, cuya población, cercana a los 132 millones de habitantes, se proyecta que alcanzará entre 147 y 148 millones hacia mediados de siglo (Consejo Nacional de Población, 2023), lo cual plantea desafíos críticos para garantizar la seguridad alimentaria futura.

Figura 1.

Número de personas en países/territorios GRFC que enfrentan inseguridad alimentaria aguda, 2016–2022.



Fuente: *Elaboración propia a partir del FSIN & Global Network Against Food Crises (2023), Global Report on Food Crises.*

Ante estos retos, resulta crucial explorar alternativas agroecológicas innovadoras y sostenibles. Una opción prometedora es la implementación de huertos urbanos, que permite el cultivo en espacios reducidos dentro de las zonas urbanas (Langemeyer & Madrid-Lopez, 2021). Además, este tipo de producción puede mitigar impactos ambientales urbanos al aprovechar microclimas, reducir la huella de carbono del transporte de alimentos y fomentar una conciencia ecológica comunitaria (Nicholls et al., 2020). Esta solución cobra aún más relevancia al considerar



el envejecimiento de la población agrícola mexicana y el creciente desinterés de las nuevas generaciones por las actividades agropecuarias, fenómenos que contribuyen a una disminución proyectada de la fuerza productiva agrícola en las próximas décadas (Moctezuma et al., 2015; PAN, 2024; Consejo Nacional de Población, 2023).

Los huertos urbanos tienen el potencial de contribuir significativamente a la sostenibilidad y a la seguridad alimentaria (Nogeyre-McRae et al., 2018). Este enfoque es coherente con los objetivos de la Agenda 2030 de la ONU, que promueve el desarrollo sostenible en sus dimensiones social, económica y ambiental (Nicholls et al., 2020). Asimismo, su diseño basado en principios agroecológicos favorece la biodiversidad y promueve sistemas de producción sustentables, como lo demuestran experiencias recientes en ciudades intermedias de México (Villavicencio-Valdez et al., 2023).

A pesar del creciente interés por los huertos urbanos en México, persiste una escasez de investigación exhaustiva y una comprensión limitada de su complejidad socio-ecológica, con lagunas de conocimiento significativas en la evaluación integrada de su viabilidad y multifuncionalidad (Langemeyer et al., 2021). En particular, si bien se reconoce que los huertos urbanos y los sistemas agroecológicos tienden a ser menos dependientes de insumos externos, el enfoque de frontera estocástica de producción no ha sido ampliamente aplicado para estimar su autonomía productiva en este contexto (Villavicencio-Valdez et al., 2023). Diversos estudios han demostrado la importancia de evaluar comparativamente la sustentabilidad entre diferentes sistemas productivos, subrayando las ventajas de los enfoques agroecológicos sobre los métodos convencionales (Moctezuma et al., 2015). Esta investigación busca cubrir ese vacío mediante una propuesta cuantitativa y cualitativa, aplicada a huertos urbanos familiares en Puebla.



En síntesis, este estudio se justifica no solo por la necesidad urgente de fortalecer la seguridad alimentaria en zonas urbanas mexicanas, sino también por la importancia de generar modelos científicos robustos que permitan medir, analizar y replicar la autonomía sustentable de los huertos urbanos familiares en contextos de vulnerabilidad social, ecológica y económica. Como señalan Guzmán Fernández et al. (2020), este tipo de huertos pueden fortalecer la sostenibilidad local en entornos urbanos caracterizados por profundas desigualdades estructurales y deterioro ambiental. Además, estudios recientes indican que estos huertos fomentan la cohesión comunitaria y aumentan la resiliencia alimentaria de los habitantes urbanos (Villavicencio-Valdez et al., 2023; Langemeyer et al., 2021).

1.2 Formulación del problema de investigación

La agricultura urbana familiar enfrenta desafíos complejos de sostenibilidad que requieren enfoques analíticos integrales capaces de evaluar simultáneamente la eficiencia energética, las restricciones bioclimáticas y el desempeño productivo. Los métodos tradicionales de evaluación económica, como el análisis costo-beneficio, resultan insuficientes al omitir dimensiones ambientales y energéticas esenciales para comprender la viabilidad de los agroecosistemas urbanos (Boardman et al., 2018). Esta limitación genera una brecha crítica en la comprensión de los factores que determinan la autonomía y sustentabilidad de huertos urbanos familiares en ciudades intermedias mexicanas.

En particular, la literatura muestra una fragmentación metodológica: la emergía permite cuantificar flujos energéticos bajo una unidad común (Odum, 1996), la integral térmica evalúa la disponibilidad climática para el crecimiento vegetal (McMaster & Wilhelm, 1997; Bonhomme, 2000) y las fronteras estocásticas de producción estiman la eficiencia técnica (Battese & Coelli, 1995). Sin embargo, estos enfoques se han aplicado de manera aislada, sin articularse en un marco



que considere simultáneamente las dimensiones energéticas, térmicas y productivas de los sistemas agroecológicos urbanos.

Esta carencia metodológica limita la capacidad de diseñar estrategias de manejo y políticas públicas que optimicen, al mismo tiempo, la autonomía energética, la adaptación climática y la eficiencia técnica de los huertos urbanos. En el caso de Puebla, donde el 73% de las familias manifiestan interés en cultivar alimentos agroecológicos, pero solo el 9% los produce actualmente, la falta de marcos integrados dificulta identificar los factores críticos que determinan su viabilidad, escalabilidad y replicabilidad (Muñoz-Núñez et al., 2022).

En consecuencia, el problema de investigación se formula como la necesidad de desarrollar y aplicar un modelo analítico integrado que combine la metodología energética, la integral térmica y el análisis de frontera estocástica de producción. Dicho modelo permitirá evaluar de manera coherente la autonomía energética, la disponibilidad térmica y la eficiencia técnica de los huertos urbanos familiares, contribuyendo a fortalecer la seguridad alimentaria y la resiliencia urbana en ciudades intermedias como Puebla.

1.3 Preguntas de investigación

1. ¿Cuáles son los factores socioambientales que inciden en la autonomía energética y en la eficiencia técnica de la producción sustentable de alimentos vegetales en huertos urbanos familiares?
2. ¿Cuál es el efecto de la temperatura ambiente, medida en grados-día de desarrollo, sobre la productividad de los alimentos vegetales en el huerto urbano?
3. ¿Qué aspectos energéticos, térmicos, técnicos y socioambientales determinan la sustentabilidad del huerto urbano familiar en la producción de alimentos vegetales?



1.4 Hipótesis

1.4.1 Hipótesis general

La autonomía energética y la producción sustentable de alimentos vegetales en huertos urbanos familiares están determinadas por la interacción de factores socioambientales, condiciones climáticas medidas en grados-día de desarrollo y la eficiencia técnica, de modo que la integración de estos aspectos fortalece la sustentabilidad del sistema y la capacidad productiva de las familias urbanas.

1.4.2 Hipótesis específicas

1. Los factores socioambientales —como disponibilidad de agua, disponibilidad de espacio para cultivo, radiación solar (incluida en el análisis energético) y saberes familiares— inciden de manera significativa en la autonomía energética y en la eficiencia técnica de la producción sustentable de alimentos vegetales en huertos urbanos familiares.

2. La temperatura ambiente, medida a través de los grados-día de desarrollo, determina el ritmo de crecimiento y la productividad de los alimentos vegetales en el huerto urbano, constituyendo una herramienta predictiva para planificar siembras y cosechas en función de las condiciones climáticas locales.

3. La sustentabilidad del huerto urbano familiar en la producción de alimentos vegetales está determinada por la interacción de aspectos energéticos (autonomía energética), térmicos (integral térmica), técnicos (eficiencia productiva estimada mediante modelos de frontera estocástica) y socioambientales, de modo que la integración de estos factores fortalece la capacidad del sistema para sostener una producción estable y resiliente.



1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Analizar la autonomía energética y la eficiencia técnica de huertos urbanos familiares en Puebla, mediante un modelo de frontera estocástica de producción que integre la integral térmica y factores socioambientales, con el fin de evaluar su potencial para la producción sustentable de alimentos vegetales.

1.5.2 Objetivos específicos

- ✓ 1. Identificar los factores socioambientales que inciden en la autonomía energética y en la eficiencia técnica de huertos urbanos familiares mediante encuestas y caracterización de insumos locales.
- ✓ 2. Implementar y evaluar un diseño experimental de huertos urbanos familiares con especies hortícolas representativas (acelga, espinaca, lechuga y tomate), a fin de obtener datos productivos relevantes.
- ✓ 3. Monitorear las variables climáticas (temperatura, humedad relativa y radiación solar), calcular los grados-día de desarrollo (integral térmica) y analizar su efecto sobre el rendimiento y la planificación de la producción.
- ✓ 4. Cuantificar el crecimiento y rendimiento de los vegetales producidos en el huerto urbano familiar, relacionándolos con las condiciones climáticas y el manejo agroecológico.
- ✓ 5. Estimar la autonomía energética y la eficiencia técnica de los huertos urbanos familiares mediante el balance de flujos energéticos y la aplicación de un modelo de frontera estocástica de producción que incorpore variables energéticas, térmicas y socioambientales.



CAPÍTULO 2. MARCO DE REFERENCIA

2.1 Marco teórico

2.1.1 Antecedentes históricos de la agricultura urbana

La práctica del huerto urbano familiar encuentra sus raíces en la agricultura urbana y periurbana, cuyos antecedentes pueden rastrearse hasta civilizaciones antiguas como la mesopotámica, la romana y la azteca, siendo estas últimas particularmente evidentes en sistemas como las chinampas prehispánicas y el jardín mexicana de Chapultepec (Villavicencio-Valdez et al., 2023). Estas prácticas se reactivaron en contextos de crisis como las guerras mundiales, la crisis económica de 2008 o la pandemia de COVID-19 (Langemeyer et al., 2021; Lal, 2020), donde se evidenció la importancia de producir alimentos localmente para fortalecer la seguridad alimentaria urbana, como demuestran casos emblemáticos como los Victory Gardens, el sistema de agricultura urbana de La Habana tras la crisis soviética, o la supervivencia de Freetown durante la guerra civil de Sierra Leona (Guzmán Fernández et al., 2020; Zeeuw et al., 2011). A partir de estas experiencias históricas y globales, la investigación se centra en Puebla, donde se observa una paradoja significativa: mientras el 73% de las familias manifiestan interés en cultivar alimentos agroecológicos, solo el 9% los produce actualmente (Muñoz-Nuñez et al., 2022).

Este bajo porcentaje de adopción se explica por barreras como la falta de espacio, tiempo, tierra y agua, que reflejan obstáculos estructurales del desarrollo urbano contemporáneo. La presente investigación busca responder a esos retos mediante modelos de autonomía productiva sustentable. Diversos estudios recientes han abordado los huertos urbanos desde múltiples perspectivas, destacando su papel en la producción de alimentos vegetales, la seguridad alimentaria y la sustentabilidad ambiental (Nicholls et al., 2020; Yuan et al., 2022; Langemeyer et al., 2021). La presente investigación se enfoca en analizar la autonomía energética de huertos urbanos familiares en la ciudad de Puebla mediante un enfoque metodológico integrado que



incorpora el análisis de integral térmica, la evaluación de la emergía y transformicidad del agroecosistema, así como la aplicación de un modelo de frontera estocástica de producción (SFA) para estimar la eficiencia técnica y fortalecer la comprensión de la producción sustentable de alimentos vegetales inocuos (McDougall et al., 2018; Yuan et al., 2022).

Desde la década de 1980, se ha documentado un renovado interés en la producción de alimentos en espacios urbanos y periurbanos, particularmente en países latinoamericanos como Cuba, Brasil y Argentina, donde se han desarrollado políticas públicas y programas de apoyo que integran enfoques agroecológicos, sociales y de resiliencia alimentaria (Cruz, 2016; Castellarini, 2022). Esta evolución refleja un cambio paradigmático en la percepción de la agricultura urbana, que pasó de ser vista principalmente como una actividad de supervivencia o fuente de problemas urbanos, a ser reconocida como una estrategia multifuncional para el desarrollo sostenible de las ciudades (Langemeyer et al., 2021).

En la actualidad, múltiples investigaciones respaldan la relevancia de los huertos urbanos en la producción de alimentos vegetales, la mejora de la seguridad alimentaria y la promoción de la sustentabilidad en contextos urbanos. Santo, Palmer y Kim (2016) realizaron una revisión exhaustiva de estudios globales que destacan el potencial productivo de los huertos urbanos, especialmente en ciudades con limitaciones de espacio, identificando tanto beneficios como áreas de investigación necesarias para maximizar dicho potencial. De manera complementaria, Orsini et al. (2013) demostraron que la horticultura urbana puede contribuir significativamente a la seguridad alimentaria al proporcionar alimentos frescos, mientras que estudios recientes han evidenciado su capacidad para reducir la dependencia de cadenas de suministro externas y aumentar la resiliencia alimentaria urbana ante crisis (Langemeyer et al., 2021; Lal, 2020).



La agricultura urbana ha sido reconocida como una estrategia vital para mejorar la seguridad alimentaria en contextos urbanos vulnerables. Appearng Addo (2010) investigó la agricultura urbana y periurbana en países en desarrollo utilizando métodos combinados de teledetección y trabajo de campo, aportando evidencia sobre su dinámica y potencial. Además, de Oliveira, Raufflet y Alves (2022) analizaron la dinámica de la agricultura urbana en São Paulo, subrayando el papel crucial de actores comunitarios, como la sociedad civil y las ONG, y sus redes sociales en el fortalecimiento del acceso a alimentos sanos y sostenibles.

En relación con la producción sustentable de alimentos vegetales, se han desarrollado diferentes enfoques y herramientas para evaluar la sustentabilidad de los sistemas agrícolas, entre ellos el análisis emergético y la transformicidad. El análisis emergético permite evaluar la energía involucrada, incluyendo la energía almacenada históricamente (energía), mientras que la transformicidad (o transformity) mide la eficiencia en el uso de dicha energía, expresada como la cantidad de energía requerida por unidad de energía producida (Odum, 1996; Campbell et al., 2024).

En la ciudad de Puebla se ha observado un creciente interés tanto de la sociedad civil como de las autoridades locales en promover la agricultura urbana como una estrategia para fortalecer la sustentabilidad y la seguridad alimentaria. En este contexto, la Secretaría de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial del Estado de Puebla (SMADSOT, 2022) ha desarrollado un manual de agricultura urbana que busca fomentar la autoproducción alimentaria mediante prácticas sostenibles, adaptadas a las condiciones urbanas y periurbanas. Asimismo, estudios de caso realizados en huertos urbanos de Puebla evidencian que estos espacios no solo contribuyen al suministro de alimentos frescos, sino que también ofrecen servicios ecosistémicos



como la retención de agua, la captura de carbono y la transmisión de conocimiento comunitario (Guerrero Morales & Silva Gómez, 2016).

El concepto de autonomía energética se deriva de la teoría de la emergía desarrollada por H. T. Odum, la cual se enfoca en cuantificar el valor energético de los recursos naturales y humanos que sostienen un sistema. Esta teoría considera no solo la cantidad de energía, sino también su calidad, integrando el tiempo y la historia energética de los insumos utilizados. La autonomía energética se define como la capacidad de un sistema para sostenerse mediante el uso predominante de recursos locales, minimizando la dependencia de insumos externos. Este enfoque permite evaluar el grado de autosuficiencia de un sistema en términos energéticos, siendo especialmente útil en contextos de sostenibilidad y planeación ambiental (Odum, 1996; Brown & Ulgiati, 1999).

La integral térmica constituye un concepto fundamental en la agroclimatología que establece una relación directa entre las temperaturas ambientales acumuladas y el desarrollo fenológico de los cultivos. Esta herramienta permite identificar las condiciones térmicas óptimas para cada etapa del ciclo vegetal, facilitando la planificación de fechas de siembra, cosecha y manejo agronómico, fundamentándose en modelos de crecimiento que ajustan la eficiencia de uso de la radiación por temperatura y utilizan el tiempo térmico para estimar el desarrollo vegetal (Cao et al., 2009). Por otra parte, los modelos de frontera estocástica de producción (SFA) constituyen un enfoque econométrico ampliamente utilizado para evaluar la eficiencia técnica de proyectos productivos, al estimar la capacidad de las unidades de producción para transformar insumos en resultados y cuantificar la brecha existente entre el desempeño observado y el potencial óptimo (Kumbhakar et al., 2022).



La investigación en huertos urbanos familiares suele emplear metodologías interdisciplinarias que integran enfoques ecológicos, sociales y económicos (Anushi et al., 2024; Castellarini et al., 2022). La evaluación emergética, como metodología de contabilidad ambiental, permite articular las dimensiones energética, económica y ecológica de los sistemas agrícolas, habiendo sido aplicada en análisis de producción de alimentos y autosuficiencia doméstica (Avalos et al., 2021; Campbell & Lu, 2024). Además, la combinación del análisis emergético con los modelos de frontera estocástica de producción (SFA) ha servido para evaluar la eficiencia y sostenibilidad de huertos urbanos familiares, al permitir comparar los insumos biofísicos, los beneficios alimentarios y el nivel de autonomía productiva (McDougall et al., 2018; Campbell & Garmestani, 2012).

Por su parte los modelos de frontera estocástica (SFA, por sus siglas en inglés) constituyen una herramienta econométrica que permite estimar la eficiencia técnica de unidades productivas (Kumbhakar, 2000). Esta metodología, fundamentada en trabajos pioneros, ha sido utilizada en estudios de agricultura para evaluar la eficiencia productiva y los rendimientos de los insumos disponibles (Kumbhakar, 2000). En el caso de los huertos urbanos familiares en Puebla, estudios han evaluado el desempeño técnico de la producción de hortalizas para identificar oportunidades de mejora y niveles de autonomía productiva, aplicando evaluación emergética para un análisis holístico de su desempeño ambiental y económico (Universidad Iberoamericana Puebla, 2024; Avalos et al., 2021).

El modelo de frontera estocástica (SFA), propuesto por Aigner et al. (1977) y Meeusen & Van den Broeck (1977), ha evolucionado significativamente en las últimas décadas con el desarrollo de métodos no paramétricos (Kumbhakar et al., 2020; Parmeter et al., 2024) y bayesianos (Fried et al., 2008). Estos avances han permitido aplicar el modelo en contextos



diversos (Kumbhakar et al., 2022). En el presente estudio, el modelo SFA se adapta para integrar variables térmicas (grados-día) y energéticas (transformicidad y rendimiento energético) en la estimación de la eficiencia técnica de huertos urbanos familiares, lo cual representa una innovación metodológica contextualizada a la sostenibilidad alimentaria urbana en ciudades intermedias como Puebla.

Establecidos estos antecedentes históricos de la agricultura urbana, resulta fundamental profundizar en el componente central que justifica estos sistemas productivos: la producción de alimentos vegetales y su contribución directa al fortalecimiento de la seguridad alimentaria en entornos urbanos contemporáneos.

2.1.2 Alimentos vegetales y seguridad alimentaria

La seguridad alimentaria constituye un tema de creciente preocupación en la actualidad, especialmente en contextos urbanos donde convergen el crecimiento poblacional, las fluctuaciones térmicas y los cambios ambientales y la presión sobre los recursos naturales (FSIN & Global Network Against Food Crises, 2023; Lal, 2020). Ante esta problemática, la producción de alimentos vegetales ha emergido como una estrategia clave para fortalecer la sostenibilidad alimentaria urbana, ofreciendo dietas más equilibradas con menor impacto ambiental (Nicholls et al., 2020; Pradhan et al., 2024).

Desde una perspectiva nutricional, los alimentos vegetales desempeñan un papel fundamental en la promoción de la salud pública y la prevención de enfermedades crónicas no transmisibles, constituyendo además una opción más asequible en contextos vulnerables (Nogueira-McRae et al., 2018; Lal, 2020).

En el ámbito ambiental, diversos estudios han demostrado que los sistemas de producción basados en alimentos vegetales generan menores emisiones de gases de efecto invernadero,



requieren menos agua y reducen la presión sobre el uso del suelo, comparados con la producción animal (Langemeyer et al., 2021; Yuan et al., 2022). Estas características los posicionan como una alternativa viable para enfrentar los efectos de las variaciones térmicas en las ciudades.

La implementación de cultivos vegetales diversos en entornos urbanos contribuye significativamente a la conservación de la biodiversidad y al fortalecimiento de la resiliencia de los sistemas alimentarios (Villavicencio-Valdez et al., 2023; De Zeeuw et al., 2011). Esta diversidad reduce la dependencia de monocultivos y permite mayor adaptabilidad frente a eventos climáticos extremos o crisis en el suministro de alimentos (Yuan et al., 2022; Langemeyer et al., 2021).

Por último, la accesibilidad a alimentos vegetales producidos localmente puede mejorar sustancialmente mediante estrategias de agricultura urbana, como los huertos familiares, comunitarios o escolares, que reducen costos de transporte, fortalecen la soberanía alimentaria y promueven la equidad en el acceso a alimentos frescos (Cruz, 2016; de Oliveira et al., 2022).

2.1.2.1 Importancia de los alimentos vegetales en la nutrición humana

Los alimentos vegetales son fundamentales para una dieta saludable y equilibrada. Aportan una amplia variedad de nutrientes como vitaminas, minerales, fibra y compuestos bioactivos que resultan esenciales para el funcionamiento fisiológico del organismo humano. El consumo de alimentos vegetales, incluyendo granos enteros, vegetales, frutas, legumbres, nueces y semillas, está vinculado a mejores resultados de salud, incluyendo un menor riesgo de enfermedades crónicas como enfermedad cardiovascular, diabetes tipo 2 y ciertos cánceres (Timm et al., 2023).

Esta importancia nutricional se respalda con evidencia empírica, ya que diversos estudios han demostrado que el consumo regular de frutas y hortalizas se asocia con la prevención de enfermedades crónicas. Un metaanálisis de 95 estudios encontró que el consumo de frutas y



verduras se asoció con un riesgo reducido de enfermedad cardiovascular, cáncer y mortalidad por todas las causas (Aune et al., 2017).

El consumo cotidiano de hortalizas como acelga, chile, espinaca, lechuga, tomate y zanahoria resulta indispensable para el mantenimiento de una dieta equilibrada, al proveer nutrientes clave (véase Tabla 1). Estas hortalizas aportan vitaminas esenciales como la vitamina A y C, minerales como potasio, hierro y calcio, así como fibra dietética y compuestos bioactivos específicos (Timm et al., 2023; Aune, 2019; U.S. Department of Agriculture, 2025). Por ejemplo, las vitaminas C y A presentes en estos alimentos participan en funciones esenciales como la salud cardiovascular y la salud ocular (Krinsky et al., 2003; Aune, 2019). A su vez, minerales como el potasio y el calcio contribuyen al mantenimiento de la salud cardiovascular y la función celular (Aune, 2019; NogueiraMcRae & Suter, 2018).

La fibra dietética, presente en cantidades variables en estas hortalizas (1.2-2.8 g por 100g según se detalla en la Tabla 1), mejora la salud digestiva y contribuye al control de la glucemia (Timm et al., 2023). Asimismo, los compuestos bioactivos —como el licopeno en el tomate (2.6 mg), la capsaicina en el chile (0.01-1.8%) y la luteína en la espinaca (12.2 mg)— han demostrado tener propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y quimiopreventivas, lo que refuerza su relevancia en la reducción del riesgo de enfermedades crónicas no transmisibles (Lu et al., 2020; Krinsky et al., 2003; Ried & Fakler, 2011).



Tabla 1.*Principales vitaminas, minerales y compuestos bioactivos en hortalizas seleccionadas*

Hortaliza	Vitaminas principales	Minerales principales	Fibra dietética	Compuestos bioactivos	Fuente principal
Acelga	Vitamina K (830 µg), A (6120 IU), C (30 mg), E (1.89 mg)	Magnesio (81 mg), Potasio (379 mg), Hierro (1.8 mg), Calcio (51 mg)	1.6 g	Betacaroteno, luteína, zeaxantina, betalainas	(U.S. Department of Agriculture, 2025)
Espinaca	Vitamina K (483 µg), A (9380 IU), C (28 mg), Folato (194 µg)	Hierro (2.71 mg), Magnesio (79 mg), Potasio (558 mg), Calcio (99 mg)	2.2 g	Luteína (12.2 mg), zeaxantina (0.33 mg), nitrato	(U.S. Department of Agriculture, 2025; Sommerburg et al., 1998)
Lechuga	Vitamina K (126 µg), A (8710 IU), C (9.2 mg), Folato (136 µg)	Potasio (260 mg), Hierro (0.97 mg), Calcio (36 mg)	2.1 g	Flavonoides, lactucina, taraxasterol	(U.S. Department of Agriculture, 2025)
Tomate	Vitamina C (27.2 mg), A (833 IU), K (7.9 µg), B6 (0.08 mg)	Potasio (260 mg), Fósforo (28 mg), Magnesio (11.9 mg)	2.1 g	Licopeno (2.6 mg), betacaroteno (449 µg), flavonoides	(U.S. Department of Agriculture, 2025; Ried & Fakler, 2011)

Elaboración propia basada en: U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service. FoodData Central. <https://fdc.nal.usda.gov/> y estudios científicos complementarios citados.

2.1.2.2 Concepto y dimensiones de la seguridad alimentaria

La seguridad alimentaria constituye un derecho humano fundamental y un componente esencial del desarrollo sostenible (FAO, 1996). Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), se alcanza seguridad alimentaria "cuando todas las personas tienen en todo momento acceso físico, social y económico a alimentos suficientes, inocuos y nutritivos que satisfagan sus necesidades alimentarias y preferencias para una vida activa y saludable" (Giovannucci et al., 2012). Esta definición ha sido adoptada ampliamente en la literatura académica y en las agendas de políticas públicas internacionales (Warren et al., 2015; Orsini et al., 2013).



De acuerdo con el marco conceptual establecido por la FAO (2006), la seguridad alimentaria se compone de cuatro dimensiones clave: disponibilidad, acceso, utilización y estabilidad (ver Tabla 2), cuya interacción permite comprender las causas estructurales de la inseguridad alimentaria y las estrategias necesarias para afrontarla de forma integral (Warren et al., 2015; GRFC, 2023).

- **Disponibilidad**

Esta dimensión se refiere a la cantidad y calidad de alimentos existentes dentro de una región o sistema determinado (Warren et al., 2015). Incluye la producción agrícola, las reservas alimentarias, las importaciones y exportaciones, así como la infraestructura de distribución (Lal, 2020; Langemeyer et al., 2021). En el contexto de los huertos urbanos, la disponibilidad se expresa en la capacidad de estos espacios para generar alimentos frescos y saludables que complementen la dieta de las familias urbanas (Orsini et al., 2013; Urías & Ochoa, 2020).

- **Acceso**

Hace referencia a la capacidad de los hogares e individuos para adquirir alimentos disponibles en los mercados o mediante el autoabastecimiento. Factores como los ingresos, los precios, la equidad en la distribución y la infraestructura de movilidad influyen en esta dimensión (de Oliveira et al., 2022; Warren et al., 2015). En este sentido, la agricultura urbana permite reducir barreras económicas y logísticas al acercar la producción alimentaria al consumidor final (Cruz, 2016; Urías & Ochoa, 2020).

- **Utilización**

Esta dimensión aborda el aprovechamiento biológico de los alimentos consumidos (Warren et al., 2015). Está vinculada con la diversidad de la dieta, la calidad nutricional, el acceso a agua potable y servicios de salud, así como con el conocimiento sobre prácticas de alimentación



saludable (Urías & Ochoa, 2020; Cruz, 2016). Estudios han demostrado que el consumo de alimentos vegetales producidos localmente contribuye a mejorar el estado nutricional y a reducir riesgos de enfermedades crónicas (Aune et al., 2017; Nicholls et al., 2020).

- **Estabilidad**

Implica que las otras tres dimensiones se mantengan en el tiempo sin verse afectadas por crisis económicas, conflictos sociales, variaciones climáticas u otras perturbaciones (Guzmán Fernández et al., 2020; Urías & Ochoa, 2020). La estabilidad alimentaria es especialmente importante en contextos urbanos vulnerables ante desastres o interrupciones del suministro global (Langemeyer et al., 2021; Lal, 2020)

En este marco conceptual, la agricultura urbana representa una estrategia viable y adaptativa para fortalecer la seguridad alimentaria en las ciudades intermedias de América Latina, al contribuir tanto a la disponibilidad como al acceso, sin descuidar los aspectos nutricionales y de resiliencia del sistema alimentario (Cruz, 2016; Nicholls et al., 2020; Nogueira-McRae et al., 2018).

Tabla 2.

Dimensiones de la Seguridad Alimentaria Elaboración propia con base en FAO (1996, 2006, 2008) y fuentes científicas complementarias.

Dimensión	Descripción	Aspectos clave
Disponibilidad	Existencia física de alimentos en cantidad y calidad	Producción local, reservas estratégicas, comercio nacional/internacional
Acceso	Capacidad física y económica de obtener alimentos	Ingresos, precios, distribución equitativa, proximidad a alimentos
Utilización	Aprovechamiento nutricional de los alimentos consumidos	Diversidad dietética, inocuidad, prácticas alimentarias, salud pública
Estabilidad	Continuidad de disponibilidad, acceso y utilización en el tiempo	Resiliencia ante crisis, políticas de seguridad alimentaria, adaptación a las variaciones térmicas y ambientales



La elaboración de la tabla 2 responde a la necesidad de operacionalizar el marco teórico de la FAO para el análisis específico de huertos urbanos familiares. Si bien las cuatro dimensiones fueron establecidas oficialmente por la FAO (2006), su aplicación contextual requiere la incorporación de aspectos específicos identificados en estudios empíricos recientes sobre agricultura urbana (Warren et al., 2015; Villavicencio-Valdez et al., 2023; Nicholls et al., 2020), permitiendo así un análisis más preciso de la realidad de las ciudades intermedias latinoamericanas. Esta estructura permite analizar la seguridad alimentaria urbana desde un enfoque multidimensional que se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente el ODS 2 (hambre cero) y el ODS 11 (ciudades sostenibles). En el caso de Puebla, el fortalecimiento de los huertos urbanos contribuye de forma directa a esta agenda al combinar producción agroecológica, integración social y adaptación climática.

2.1.2.3 Desafíos de la seguridad alimentaria en áreas urbanas

El crecimiento de la población urbana y la rápida urbanización plantean desafíos importantes para la seguridad alimentaria en las ciudades (Lal, 2020; Urías & Ochoa, 2020). Uno de los principales desafíos es la disponibilidad de alimentos, ya que la producción de alimentos suele estar concentrada en áreas rurales y debe ser transportada a las ciudades (Cruz, 2016; Orsini et al., 2013), lo que puede resultar en pérdidas y desperdicios (Lal, 2020; Langemeyer et al., 2021). Además, las áreas urbanas pueden ser más vulnerables a las fluctuaciones de precios y a la inestabilidad del suministro de alimentos debido a su dependencia de las importaciones y las cadenas de suministro globalizadas (Langemeyer et al., 2021; Lal, 2020).

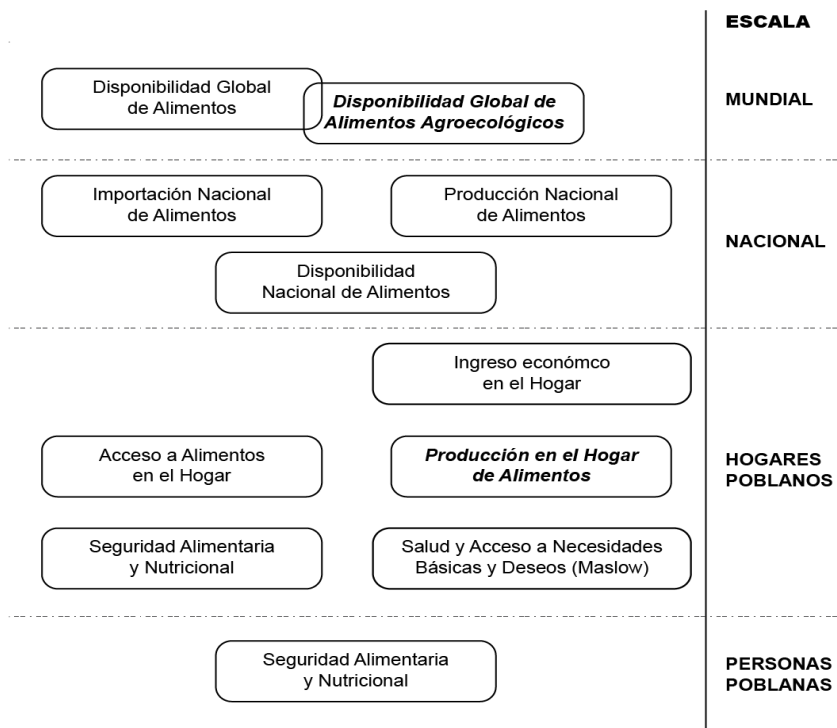
Smith (2002) proporciona un marco integral para entender la seguridad alimentaria a través de varias escalas (figura 2). A nivel mundial, se refieren a la disponibilidad total de alimentos y su distribución entre países (Cruz, 2016; Smith, 2002). A nivel nacional, la seguridad alimentaria



implica la capacidad de un país para asegurar la disponibilidad y acceso a alimentos para todos sus ciudadanos, lo que requiere tanto producción interna como importaciones para cubrir la demanda (Pérez-Escamilla, 2005; Smith, 2002). A nivel regional y local, la seguridad alimentaria se refiere a la capacidad de las regiones y comunidades locales para producir y distribuir alimentos a sus poblaciones (Cruz, 2016; Nicholls et al., 2020; Smith, 2002). A nivel individual, la seguridad alimentaria se trata de asegurar que cada persona tenga acceso físico y económico a alimentos suficientes, seguros y nutritivos para satisfacer sus necesidades dietéticas y preferencias alimentarias para llevar una vida activa y saludable (Pérez-Escamilla, 2005; Smith, 2002). Este enfoque múltiple-escala subraya la complejidad y el entrelazamiento de la seguridad alimentaria y cómo los factores a una escala pueden influir en los resultados a otras escalas cómo se aprecia en la figura 2 (Pérez-Escamilla, 2005; Smith, 2002).

Figura 2.

Marco integral seguridad alimentaria. Elaboración propia a partir de datos de Smith (2002).



El acceso a alimentos saludables y asequibles es un desafío en las áreas urbanas, especialmente para los hogares de bajos ingresos, donde "las disparidades en el acceso a los alimentos son motivo de gran preocupación" debido a su impacto en la dieta y la obesidad (Larson et al., 2009; Urías & Ochoa, 2020). Estos hogares enfrentan dificultades para adquirir alimentos nutritivos debido a la falta de recursos económicos (Orsini et al., 2013; Urías & Ochoa, 2020), siendo las comunidades de bajos ingresos las más afectadas por el acceso limitado a supermercados y productos saludables (Larson et al., 2009). Esta situación se agrava por la presencia de tiendas de alimentos que ofrecen opciones limitadas y menos saludables (Larson et al., 2009). La utilización de alimentos en entornos urbanos puede verse afectada por la falta de conocimientos sobre nutrición (Warren et al., 2015) y la carencia de conocimiento técnico entre los agricultores urbanos, así como por el estrés, aunque la agricultura urbana ha demostrado disminuirlo y mejorar la salud mental (Flores Guevara et al., 2024; Urías & Ochoa, 2020).

2.1.3 Huertos urbanos y producción sustentable de vegetales

Los huertos urbanos han emergido como una estrategia viable para promover la producción sustentable de vegetales, mejorar la seguridad alimentaria y fomentar la resiliencia de las comunidades urbanas (Anushi et al., 2024). Desde una perspectiva ecológica, los huertos urbanos pueden mejorar la sostenibilidad al utilizar espacios subutilizados, como terrenos baldíos, techos y balcones, para la producción de alimentos (Irazú Olvera Cuessy et al., 2024; Santo et al., 2016). Además, la implementación de prácticas agrícolas sostenibles en huertos urbanos, como el uso de compost y sistemas de riego eficiente, puede reducir la demanda de recursos naturales y disminuir la huella ecológica (Langemeyer et al., 2021; Cruz, 2016).

Los huertos urbanos también pueden contribuir a la biodiversidad y a la conservación de los ecosistemas locales (Villavicencio-Valdez et al., 2023; Guerrero, 2024). La promoción de la



diversidad de cultivos en huertos urbanos puede aumentar la resiliencia de los sistemas de producción y reducir la dependencia de insumos externos, como fertilizantes y plaguicidas (Villavicencio-Valdez et al., 2023; Langemeyer et al., 2021). En términos de beneficios socioeconómicos, los huertos urbanos pueden fortalecer la seguridad alimentaria al aumentar la disponibilidad y accesibilidad de alimentos frescos y nutritivos en áreas urbanas, especialmente en comunidades de bajos ingresos (Nicholls et al., 2020). Además, estos huertos pueden generar empleo y empoderamiento económico, especialmente para las mujeres y otros grupos vulnerables (Cruz, 2016).

Además, pueden fomentar la educación ambiental y el compromiso comunitario al involucrar a los residentes en la producción de alimentos y en la toma de decisiones (Castellarini, 2022; Langemeyer et al., 2021). Esto puede generar un mayor sentido de pertenencia y una mejor calidad de vida (Cruz, 2016; Pantoja, 2025), así como una mayor conciencia sobre la importancia de la sostenibilidad y la producción de alimentos (Anushi et al., 2024; SMADSOT, 2022).

2.1.3.1 Definición y tipos de huertos urbanos

Los huertos urbanos se definen como espacios dentro de áreas urbanas o periurbanas donde se cultivan plantas, especialmente vegetales, para consumo humano (Orsini et al., 2013; Mougeot, 2000). Estos huertos pueden adoptar diferentes formas y tamaños, desde jardines comunitarios y huertos escolares hasta jardines en terrazas y balcones (Anushi et al., 2024; Villavicencio et al., 2023; Viljoen et al., 2005). Los huertos urbanos pueden ser gestionados por individuos, familias, grupos comunitarios, organizaciones no gubernamentales (ONG) o entidades gubernamentales (Cruz, 2016; Castellarini, 2022; Smit et al., 1996).

En el contexto latinoamericano, la agricultura urbana presenta características particulares que reflejan tanto necesidades de subsistencia como valores culturales y educativos (Cruz, 2016).



Los huertos urbanos cumplen diversas funciones: huertos de subsistencia, orientados a la producción de alimentos para autoconsumo y seguridad alimentaria familiar (Cruz, 2016; Villavicencio et al., 2023; Smit & Bailkey, 2006); huertos educativos, enfocados en la formación ambiental y transmisión de conocimientos agroecológicos (Villavicencio et al., 2023); y huertos terapéuticos, utilizados para promover el bienestar físico y mental de los participantes (Audate, 2019; Pantoja-Calderon et al., 2025; Viljoen et al., 2005).

2.1.3.2 Beneficios y retos de los huertos urbanos

Los huertos urbanos ofrecen numerosos beneficios, como la producción local de alimentos frescos y nutritivos, lo que puede mejorar la seguridad alimentaria y la calidad de la dieta (Warren et al., 2015). También pueden contribuir a la educación y el intercambio de conocimientos (Guzman-Fernandez et al., 2020; Orsini et al., 2013), la cohesión social (Nicholls et al., 2020) y el empoderamiento comunitario al fomentar la participación y el desarrollo de capacidades locales (Cruz, 2016; Orsini et al., 2013).

Además, los huertos urbanos pueden proporcionar beneficios ambientales, como la reducción de la huella ecológica (De Zeeuw et al., 2011; Viljoen, 2005), la conservación del agua, la mejora de la calidad del aire y la biodiversidad (Guerrero, 2024; Orsini et al., 2013), y la mitigación de variaciones térmicas extremas (Nicholls et al., 2020; McDougall et al., 2018). Los huertos urbanos también pueden fomentar la equidad social y la inclusión, al proporcionar espacios de encuentro y participación para grupos vulnerables y marginados (Cruz, 2016). La figura 3 sintetiza los principales beneficios y retos asociados con los huertos urbanos.



Figura 3.

Huertos Urbanos: Perspectiva Integral. Elaboración propia a partir de datos de datos de literatura.



Sin embargo, también existen desafíos asociados con los huertos urbanos, como la falta de espacio (Pradhan, 2024) y la competencia por el uso del suelo en áreas urbanas, la contaminación del suelo y del agua, la falta de recursos y apoyo institucional, y la necesidad de desarrollar prácticas de producción adecuadas y sostenibles (Orsini et al., 2013; Anushi et al., 2024). Uno de los principales desafíos es la falta de conocimientos y capacitación en técnicas de cultivo y manejo agroecológico de huertos urbanos, lo que puede limitar su éxito y sustentabilidad (Anushi et al., 2024; Guzman-Fernandez et al., 2020). Particularmente en contextos urbanos, la seguridad alimentaria puede verse comprometida por problemas de contaminación ambiental que afectan la inocuidad de los alimentos producidos (Romanova et al., 2021; Orsini et al., 2013).

Los huertos urbanos representan una oportunidad para abordar los desafíos de la seguridad alimentaria, la equidad social y la sustentabilidad ambiental en áreas urbanas. A través de la adopción de prácticas de producción sustentable y la superación de los desafíos asociados, los huertos urbanos pueden contribuir significativamente a mejorar la salud, el bienestar y la calidad de vida de las poblaciones urbanas (Anushi et al., 2024; Villavicencio-Valdez et al., 2023). Además, promueven la resiliencia urbana al incrementar el acceso a alimentos frescos y nutritivos, reducir la huella de carbono y fortalecer la cohesión comunitaria, aunque persisten retos como la escasez de espacio, la contaminación del suelo y agua, y la falta de apoyo institucional (Pradhan, 2024).

2.1.3.3 Principios de producción sustentable en huertos urbanos

La producción sustentable en huertos urbanos implica la adopción de prácticas agrícolas que sean respetuosas con el medio ambiente, socialmente justas y económicamente viables (SMADSOT, 2022). El sistema de huerto urbano requiere un enfoque integral que considere desde la planificación inicial hasta la gestión de residuos orgánicos (Anushi et al., 2024; Mougeot, 2006).

Los principios de producción sustentable en el sistema huerto urbano incluyen múltiples etapas interconectadas (Orsini et al., 2013). La planificación del huerto debe considerar la selección de ubicación adecuada con acceso a luz solar directa, el establecimiento de un plan de gestión de residuos y la selección de hortalizas apropiadas para aprovechar los desechos orgánicos como compost (SMADSOT, 2022). La preparación del sustrato sustentable involucra la limpieza del terreno, la incorporación de materiales orgánicos y compost para mejorar la fertilidad del suelo, y la preparación adecuada de las camas de siembra (SMADSOT, 2022; Viljoen, 2005).

La fase de siembra requiere la selección de semillas de alta calidad apropiadas para las condiciones climáticas y tipo de suelo del huerto, siguiendo las instrucciones de siembra para cada



especie y cubriendo las semillas adecuadamente (SMADSOT, 2022) (véase Figura 4). El cuidado de las plantas incluye riego regular pero controlado, evitando el encharcamiento, control de plagas y enfermedades mediante métodos orgánicos, y fertilización equilibrada con compost (Orsini et al., 2013).

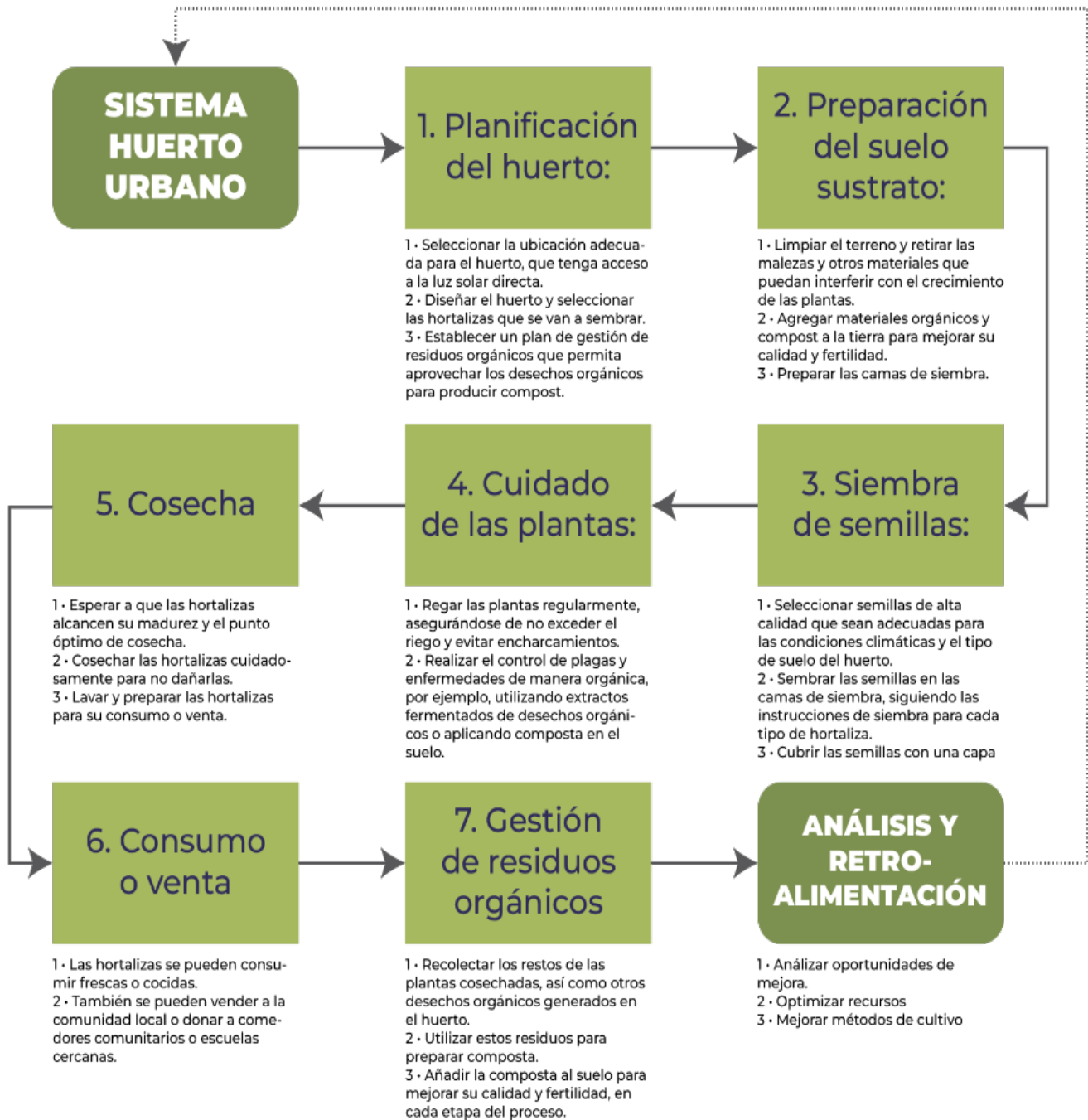
Además, la promoción de la biodiversidad mediante la diversificación de cultivos y la conservación de variedades locales es fundamental para la producción sustentable (Villavicencio-Valdez et al., 2023). La cosecha debe realizarse en el punto óptimo de madurez, conservando las hortalizas cuidadosamente y lavándolas antes del consumo para garantizar la seguridad alimentaria (SMADSOT, 2022). Finalmente, la gestión de residuos orgánicos cierra el ciclo sustentable mediante la recolección de restos vegetales, la utilización de estos residuos para compost y la adición del compost al suelo para mejorar su fertilidad (Mougeot, 2006).

Este enfoque sistémico permite implementar prácticas de producción sustentable que incluyen la selección adecuada de especies, la rotación de cultivos, la siembra intercalada y la utilización de abonos verdes y orgánicos, contribuyendo así a la resiliencia y adaptación a las variaciones térmicas en contextos urbanos. Además, estas estrategias ayudan a superar limitaciones comunes como la escasez de espacio, la contaminación del suelo y la falta de apoyo institucional, fortaleciendo el papel de la agricultura urbana como herramienta para la seguridad alimentaria y el desarrollo sostenible (Cruz, 2016; Pradhan, 2024).



Figura 4.

Procesos dentro del Huerto Urbano. elaboración propia.



2.1.3.4 Fundamentos teóricos de la agricultura urbana

Los sistemas agrícolas urbanos enfrentan restricciones ambientales y económicas específicas que requieren adaptaciones tecnológicas y de gestión para mantener viabilidad económica en condiciones de alta densidad poblacional y costos de oportunidad del suelo elevados (Orsini et al., 2013). Los sistemas urbanos se enfocan en "productos rápidamente perecederos" y carecen de "servicios formales de extensión agrícola", mientras que requieren "mayor nivel de tecnología como hidroponía e invernaderos" comparado con la agricultura convencional (Sanyé-Mengual et al., 2015).

La metodología de análisis costo-beneficio en contextos urbanos enfrenta limitaciones específicas. Young (2014) explica que "la aplicación típica del método residual produce predicciones excesivamente optimistas" porque los analistas "pueden contabilizar inadecuadamente los costos de todos los insumos, sobreestimando así el valor correcto" y "utilizar precios y rendimientos excesivamente optimistas". El análisis ajustado corrige estas deficiencias incorporando precios sombra, costos de oportunidad completos y perspectivas temporales adecuadas que revelan la verdadera viabilidad económica (Boardman et al., 2018).

2.1.4 Inocuidad de alimentos vegetales

2.1.4.1 Concepto y relevancia de la inocuidad alimentaria

La inocuidad alimentaria en sistemas agroecológicos urbanos se define como la garantía de producción de alimentos seguros mediante prácticas preventivas de manejo que minimizan riesgos de contaminación desde el origen productivo (Romanova et al., 2021). A diferencia de los enfoques convencionales que dependen de análisis posteriores de contaminantes, la inocuidad agroecológica se fundamenta en el principio de prevención mediante el uso exclusivo de insumos orgánicos certificados, agua de calidad potable, y la eliminación de agroquímicos sintéticos que



constituyen las principales fuentes de contaminación alimentaria (Warren et al., 2015; Gliessman, 2016).

Esta aproximación preventiva reconoce que la calidad e inocuidad de los alimentos vegetales se determina fundamentalmente durante el proceso productivo, no únicamente mediante verificación analítica posterior (Altieri & Nicholls, 2018). En el marco de los huertos urbanos, la inocuidad alimentaria adquiere dimensiones específicas relacionadas con las condiciones del entorno urbano (Romanova & Lovell, 2021) y las prácticas de producción a pequeña escala, como el uso de compost casero y técnicas de cultivo orgánico (SMADSOT, 2022).

2.1.4.2 Factores que afectan la inocuidad

Los alimentos vegetales pueden verse afectados por diversos factores que comprometen su inocuidad, incluyendo contaminantes biológicos (bacterias, virus, parásitos y mohos) (Orsini et al., 2013), químicos (pesticidas, contaminantes ambientales y metales pesados) (Romanova & Lovell, 2021), y posibles contaminantes físicos como microplásticos que pueden introducirse a través del suelo, el aire y el agua durante el crecimiento, así como mediante prácticas de almacenamiento, transporte y manipulación (Orsini et al., 2013). En el contexto de la agricultura urbana, estos factores presentan características particulares que requieren consideración específica cómo se detalla en la Tabla 3. (Romanova & Lovell, 2021).



Tabla 3.

Factores que afectan la Inocuidad de los Alimentos Vegetales. Elaboración propia con base en fuentes científicas seleccionadas.

Factor de Riesgo	Descripción	Consideraciones en Agricultura Urbana	Fuentes
Calidad del Agua de Riego	Contaminación con patógenos o productos químicos que pueden transferirse a los vegetales.	Los huertos urbanos permiten mejor control de fuentes de agua, optando por agua potable o sistemas de captación pluvial	<i>Descripción:</i> Mougeot (2006); Orsini et al. (2013) <i>Consideraciones:</i> Cruz (2016); Nogueira et al. (2018)
Contaminación del Suelo	Presencia de metales pesados y contaminantes que pueden ser absorbidos por las plantas.	La agricultura urbana puede implementar análisis de suelo y remediación antes del establecimiento	<i>Descripción:</i> Romanova & Lovell (2021); Orsini et al. (2013) <i>Consideraciones:</i> Viljoen (2005); Mougeot (2006)
Prácticas de Manejo Postcosecha	Inadecuadas prácticas de limpieza, manipulación y almacenamiento que comprometen la calidad.	La proximidad productor-consumidor reduce etapas de manipulación y tiempo de almacenamiento	<i>Descripción:</i> Orsini et al. (2013) <i>Consideraciones:</i> Cruz (2016); SMADSOT (2022)
Contaminación Química	Residuos de pesticidas, fertilizantes sintéticos y sustancias químicas.	Los huertos urbanos facilitan prácticas orgánicas y uso de insumos naturales	<i>Descripción:</i> Orsini et al. (2013); Mougeot (2000) <i>Consideraciones:</i> SMADSOT (2022); Cruz (2016)
Contaminación Biológica	Microorganismos patógenos como bacterias, virus y parásitos.	El control directo en pequeña escala permite mejores prácticas de higiene	<i>Descripción:</i> Orsini et al. (2013); Mougeot (2000) <i>Consideraciones:</i> Cruz (2016); SMADSOT (2022)
Calidad del Aire	Deposición de contaminantes atmosféricos en los vegetales (Xiong et al., 2014)	Ubicación estratégica de huertos y uso de barreras naturales pueden mitigar exposición	<i>Descripción:</i> Orsini et al. (2013); Romanova & Lovell (2021) <i>Consideraciones:</i> Castellarini (2022); SMADSOT (2022)
Manipulación Durante Transporte	Condiciones insalubres durante distribución (Kader, 2005)	Los circuitos cortos de comercialización minimizan riesgos de transporte	<i>Descripción:</i> Low et al. (2015); Warren et al. (2015) <i>Consideraciones:</i> Cruz (2016); Anushi et al. (2024)



Los sistemas de producción urbana a menor escala ofrecen ventajas significativas para minimizar estos riesgos, ya que permiten un mayor control sobre los insumos utilizados y las prácticas de manejo (McDougall et al., 2018; SMADSOT, 2022). Los productores urbanos tienen mayor capacidad para supervisar la calidad del agua de riego, evitando el uso de aguas residuales o contaminadas, y pueden optar por fuentes de irrigación más seguras como sistemas de captación pluvial (Guerrero-Silva et al., 2024; Orsini et al., 2013).

La producción reducida facilita la implementación de prácticas orgánicas y agroecológicas, disminuyendo la dependencia de fertilizantes sintéticos derivados del petróleo y pesticidas químicos que pueden comprometer la inocuidad de los productos (Mougeot, 2000; Orsini et al., 2013). Los productores pueden adoptar métodos de fertilización orgánica mediante compost y abonos verdes (SMADSOT, 2022; Villavicencio-Valdez et al., 2023), así como estrategias de manejo integrado de plagas que minimizan los riesgos de contaminación química (Mougeot, 2000; SMADSOT, 2022).

Adicionalmente, la proximidad entre producción y consumo contribuye a la inocuidad al reducir los tiempos de almacenamiento y transporte, minimizando las oportunidades de contaminación post-cosecha y manteniendo la frescura de los productos (Cruz, 2016; Santo et al., 2016). Esta característica es particularmente importante en el contexto latinoamericano, donde la agricultura urbana representa una alternativa para mejorar el acceso a alimentos frescos e inocuos (Castellarini, 2022).

2.1.4.3 Buenas prácticas agrícolas y de manejo

Las buenas prácticas agrícolas (BPA) y las buenas prácticas de manejo (BPM) son esenciales para garantizar la inocuidad de los alimentos vegetales en todas las etapas de la cadena alimentaria (FAO, 2021; Vásquez Gallo, 2018). Estas prácticas incluyen la selección de semillas



y material de plantación de calidad, el manejo integrado de plagas y enfermedades, la utilización de fertilizantes y pesticidas de manera responsable y segura, y la adopción de medidas de higiene y saneamiento en el manejo de los cultivos (FAO, 2021; Vásquez Gallo, 2018). Ambas prácticas buscan mejorar la eficiencia, reducir los impactos negativos en el medio ambiente y garantizar la salud y el bienestar de la población y consumidores (FAO, 2021; Orsini et al., 2013).

Estas prácticas son un conjunto de principios y directrices desarrolladas para garantizar la producción de alimentos de alta calidad, inocuidad y sostenibilidad (FAO, 2021; Newslow, 2014). Ambas prácticas buscan mejorar la eficiencia (McDougall et al., 2018; Orsini et al., 2013), reducir los impactos negativos en el medio ambiente (FAO, 2021; Vásquez, 2018) y garantizar la salud y el bienestar de los consumidores como se muestra en la figura 5 (FAO, 2021; SMADSOT, 2022).

Pasos y procesos de las buenas prácticas agrícolas (BPA) :

1. Selección del sitio y manejo del suelo: Esto implica elegir áreas adecuadas para el cultivo, conservar y mejorar la fertilidad del suelo, y minimizar la erosión y la degradación del suelo (FAO, 2021; Vásquez Gallo, 2018).

2. Uso adecuado de insumos: Incluye el uso responsable y eficiente de fertilizantes, pesticidas y agua para riego, siguiendo las recomendaciones y regulaciones locales (FAO, 2021; Vásquez Gallo, 2018).

3. Manejo integrado de plagas y enfermedades: Promueve el uso de métodos de control biológico y cultural, así como el uso mínimo y selectivo de pesticidas químicos cuando sea necesario (FAO, 2021; McDougall et al., 2020).

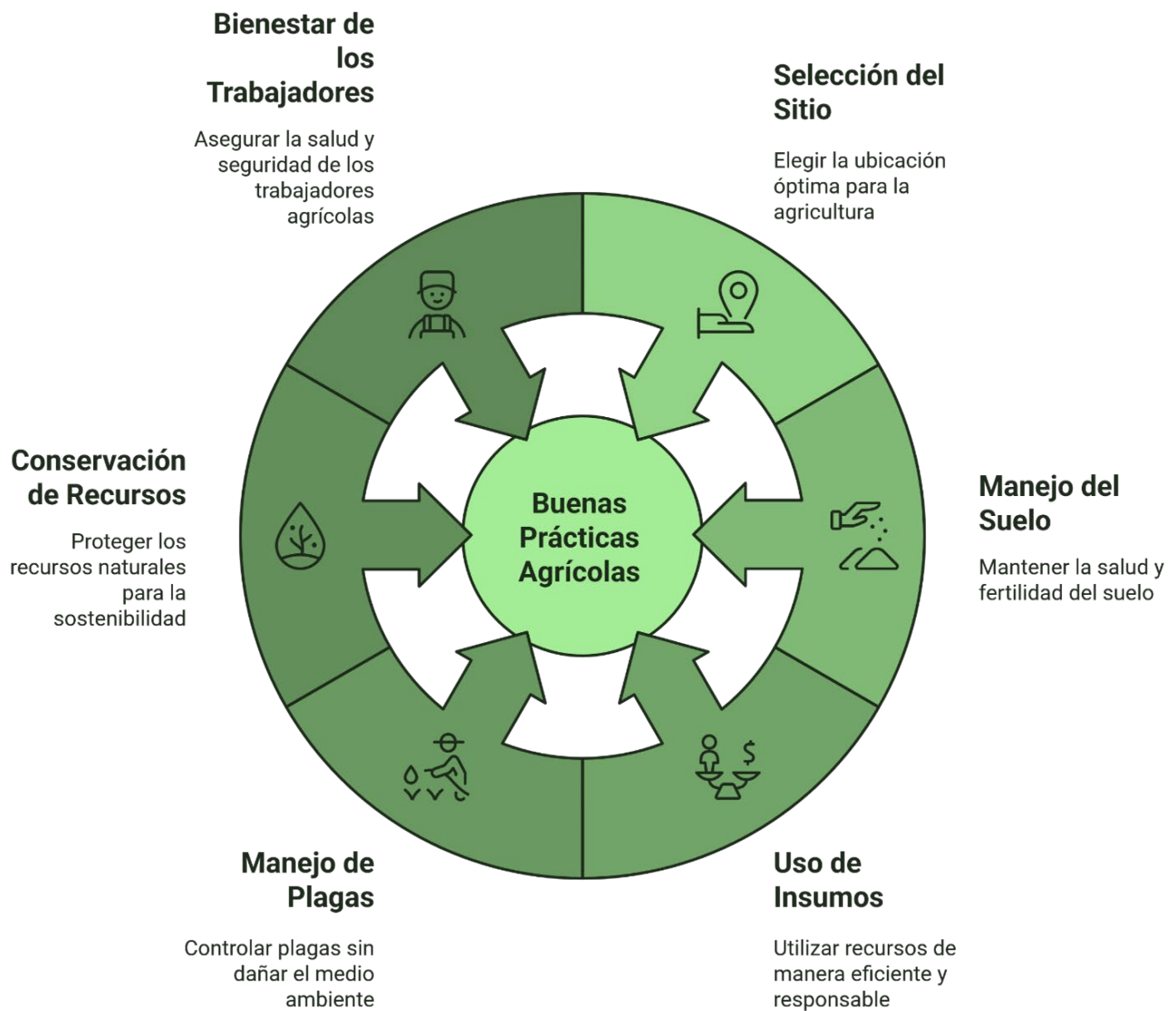
4. Conservación y uso responsable de recursos naturales: Esto implica la implementación de prácticas para proteger la biodiversidad, minimizar la contaminación del agua y el aire, y conservar los recursos hídricos y energéticos (FAO, 2021; Guzmán Fernández et al., 2020).



5. Salud y bienestar de los trabajadores: Incluye la promoción de condiciones laborales seguras y justas, capacitación y educación en prácticas agrícolas sostenibles, y el uso adecuado de equipos de protección personal.

Figura 5.

Pasos y procesos de las buenas prácticas agrícolas (BPA). Elaboración propia con base en fuentes científicas seleccionadas



Las BPA abordan diversos aspectos de la producción agrícola, incluyendo la selección del sitio y manejo del suelo, uso adecuado de insumos, manejo integrado de plagas y enfermedades, conservación y uso responsable de recursos naturales y salud y bienestar de los trabajadores (FAO, 2021; Vásquez Gallo, 2018). Por otro lado, las BPM incluyen aspectos clave como higiene y saneamiento, control de calidad y trazabilidad, capacitación y educación del personal, almacenamiento y transporte, y gestión de residuos y subproductos (FAO, 2021; Newslow, 2014).

Pasos para el control de las buenas prácticas de manejo (BPM):

1. Higiene y saneamiento: Implementación de protocolos de limpieza y desinfección de instalaciones, equipos y utensilios, y mantenimiento de un entorno higiénico en todas las etapas de la cadena de suministro (FAO, 2021; Newslow, 2014).

2. Control de calidad y trazabilidad: Establecimiento de sistemas de monitoreo y control de calidad para garantizar la inocuidad y calidad de los productos, así como sistemas de trazabilidad para rastrear el origen y destino de los productos (FAO, 2021; Vásquez Gallo, 2018).

3. Capacitación y educación del personal: Instrucción y capacitación del personal sobre prácticas higiénicas, manipulación adecuada de alimentos y prevención de la contaminación cruzada (FAO, 2021; Newslow, 2014).

4. Almacenamiento y transporte: Uso de instalaciones y vehículos adecuados y limpios para almacenar y transportar alimentos, manteniendo condiciones adecuadas de temperatura y humedad (Codex Alimentarius, 2004; FAO, 2021).

5. Gestión de residuos y subproductos: Implementación de prácticas para minimizar y gestionar adecuadamente los residuos y subproductos generados en el procesamiento y almacenamiento de alimentos (FAO, 2021; SMADSOT, 2022).



Tanto las buenas prácticas agrícolas (BPA) como las buenas prácticas de manejo (BPM) son esenciales para asegurar la producción de alimentos inocuos, sostenibles y de alta calidad (FAO, 2021; Newslow, 2014). La implementación de estas prácticas en la producción y manejo de alimentos puede disminuir el riesgo de contaminación (FAO, 2021; Calvin, 2007), mejorar la eficiencia en el uso de recursos (McDougall et al., 2018; Orsini et al., 2013), proteger el medio ambiente (FAO, 2021; Vásquez Gallo, 2018) y garantizar el bienestar de los trabajadores y consumidores (FAO, 2021; SMADSOT, 2022).

La adopción de BPA y BPM también puede incrementar la competitividad y rentabilidad de los productores y procesadores de alimentos, ya que los productos que cumplen con estas prácticas suelen ser preferidos por los consumidores y tienen más posibilidades de acceder a mercados de exportación (FAO, 2021; Vásquez Gallo, 2018). Es importante destacar que BPA y BPM son prácticas complementarias, y su aplicación conjunta puede maximizar los beneficios en términos de inocuidad, calidad y sostenibilidad en la producción y manejo de alimentos (FAO, 2021; Newslow, 2014).

Los gobiernos, organizaciones internacionales y la industria alimentaria desempeñan un papel crucial en la promoción y difusión de estas prácticas entre los productores y procesadores de alimentos, así como en la creación de incentivos y marcos regulatorios que fomenten su adopción (Calvin, 2007; FAO, 2021; Mougeot, 2006; Newslow, 2014; Oliveira et al., 2022; Orsini et al., 2013; Pantoja-Calderon et al., 2025; SMADSOT, 2022; Vásquez Gallo, 2012; Viljoen et al., 2005).

Además, las BPM en el procesamiento, almacenamiento, transporte y comercialización de alimentos vegetales, como el control de temperatura y humedad, la higiene personal y del equipo, y la prevención de la contaminación cruzada, también son fundamentales para garantizar la inocuidad (Codex Alimentarius, 2004; FAO, 2021; Newslow, 2014; Vásquez Gallo, 2012).



En esta investigación, la inocuidad se abordó desde un enfoque preventivo y agroecológico, basado en la selección consciente de insumos (agua potable de red y fertilización orgánica) y la exclusión de agroquímicos de síntesis, más que en la aplicación de pruebas fisicoquímicas o microbiológicas posteriores. Este criterio se integró en el protocolo metodológico como una medida preventiva de Buenas Prácticas Agrícolas y de Manejo, coherente con el carácter urbano y de pequeña escala de los sistemas analizados.

2.1.5 Análisis económico en sistemas productivos

El análisis de costo-beneficio clásico presenta limitaciones significativas que comprometen su precisión y aplicabilidad en la evaluación de sistemas productivos. Los métodos tradicionales de mínimos cuadrados utilizados antes de 1960 estimaban "funciones de respuesta (o promedio)" en lugar de verdaderas "funciones de producción de frontera", generando una "brecha entre la teoría y el trabajo empírico" (Battese, 1992). Además, los modelos deterministas producían "medidas de eficiencia sensibles a los valores atípicos" y estaban "sujetos a distorsiones derivadas del ruido estadístico", mientras que "centrarse únicamente en la eficiencia técnica subestima los beneficios que podrían derivarse para los agricultores individuales, así como para la sociedad" (Bravo-Ureta & Rieger, 1991).

La integración con el Análisis de Frontera Estocástica supera estas deficiencias mediante "la especificación del término de error como compuesto por dos componentes, uno normal y el otro de una distribución unilateral", lo que permite obtener "medidas de eficiencia técnica, económica y de asignación libres de distorsiones derivadas del ruido estadístico" (Aigner et al., 1977). Esta formulación estocástica descompone "la desviación total de la curva de regresión en dos términos: ruido estadístico e ineficiencia", proporcionando así "un marco para analizar las



fuentes de ineficiencia de producción y la variación de los niveles de productividad" (Kumbhakar et al., 2022).

2.1.5.1 Costo-beneficio como referencia

El análisis costo-beneficio es una herramienta clásica de evaluación económica que compara beneficios y costos de un proyecto para estimar su viabilidad social y económica (Boardman et al., 2018; Young & Loomis, 2014). En agricultura, se utiliza para valorar la eficiencia productiva, incorporando tanto costos explícitos de mercado como costos de oportunidad, y considerando beneficios ambientales y sociales cuando es posible a través de precios sombra o métodos indirectos (Bravo-Ureta & Rieger, 1991; Reinhard et al., 2002).

Este enfoque ha sido útil para evaluar la asignación eficiente de recursos, distinguiendo entre eficiencia técnica (producir al máximo con los insumos disponibles) y eficiencia asignativa (emplear la combinación de insumos que minimiza costos). Sin embargo, en sistemas urbanos presenta limitaciones significativas: tiende a sobrestimar beneficios, no incorpora adecuadamente factores ambientales y sociales, y resulta insuficiente para reflejar la complejidad de agroecosistemas urbanos.

Por ello, en esta investigación, el costo-beneficio se retoma únicamente como referencia conceptual básica, ya que presenta limitaciones importantes en agroecosistemas urbanos. La evaluación integral se aborda mediante tres metodologías complementarias: la integral térmica para cuantificar la disponibilidad climática, el análisis emergético para evaluar flujos energéticos, y el modelo de frontera estocástica de producción para estimar eficiencia técnica (Bravo-Ureta & Pinheiro, 1997; Kumbhakar et al., 2022).



2.1.5.2 Evaluación de rentabilidad en huertos urbanos familiares

La teoría de la ventaja comparativa urbana establece que los sistemas agrícolas urbanos tienden a especializarse en cultivos de alto valor por unidad de superficie, caracterizados por productos perecederos con ventajas logísticas en mercados locales y atributos diferenciados que justifican primas de precio. La ineficiencia técnica y económica reduce significativamente los márgenes económicos en la producción agrícola. Bravo-Ureta y Pinheiro (1997) documentan que la teoría de la frontera de eficiencia establece que existe una brecha sistemática entre el desempeño observado y el potencial óptimo en sistemas productivos, donde las mejoras en eficiencia económica pueden generar ahorros sustanciales de costos sin requerir cambios tecnológicos.

La teoría de la economía espacial urbana señala que los sistemas agrícolas en entornos urbanos enfrentan restricciones ambientales y económicas específicas que requieren adaptaciones tecnológicas y de gestión para mantener viabilidad económica en condiciones de alta densidad poblacional y costos de oportunidad del suelo elevados (Orsini et al., 2013). Los sistemas urbanos se enfocan en “productos rápidamente perecederos” y carecen de “servicios formales de extensión agrícola”, mientras que requieren “mayor nivel de tecnología como hidroponía e invernaderos” comparado con la agricultura convencional (Sanyé-Mengual et al., 2015).

En este contexto, algunos autores han señalado que un cultivo puede parecer rentable en evaluaciones económicas convencionales, pero tales aproximaciones presentan limitaciones metodológicas importantes. Young (2014) advierte que “la aplicación típica del método residual produce predicciones excesivamente optimistas” porque los analistas “pueden contabilizar inadecuadamente los costos de todos los insumos, sobreestimando así el valor correcto” y “utilizar precios y rendimientos excesivamente optimistas”. Evaluaciones más ajustadas, como las



planteadas por Boardman et al. (2018), incorporan precios sombra, costos de oportunidad completos y perspectivas temporales adecuadas para aproximar la verdadera viabilidad económica.

2.1.6 Integral térmica y grados-día de desarrollo

Como primera herramienta de esta evaluación integral, la integral térmica y los grados-día de desarrollo (GDD) constituyen herramientas fundamentales en la agrometeorología y la fenología, pues permiten cuantificar la energía térmica acumulada necesaria para el crecimiento y desarrollo de los cultivos (McMaster & Wilhelm, 1997; Bonhomme, 2000; Trudgill, 2005). Este enfoque parte de la premisa de que el desarrollo fisiológico de las plantas no depende únicamente del tiempo cronológico, sino de la temperatura efectiva a la que están expuestas, lo que convierte a los GDD en un indicador clave de la dinámica de crecimiento y productividad vegetal (McMaster & Wilhelm, 1997; Bonhomme, 2000).

La relevancia de este concepto radica en su capacidad para modelar y predecir el comportamiento de diferentes especies en diversos entornos, aportando un marco cuantitativo que respalda la planificación agrícola y la optimización de la producción (Trudgill, 2005). Asimismo, su uso se ha extendido a la investigación en adaptación al cambio climático, dado que permite anticipar los efectos de variaciones térmicas en los ciclos fenológicos y en el rendimiento de los cultivos (Hatfield & Prueger, 2015; Semenov & Stratonovitch, 2015).

De manera adicional, la integral térmica constituye una base flexible para el desarrollo de modelos más sofisticados que incorporan factores ambientales como el fotoperíodo, la vernalización o condiciones ecofisiológicas específicas, ampliando así su aplicabilidad tanto en sistemas agrícolas convencionales como en la producción urbana de alimentos (McMaster & Wilhelm, 1997; Bonhomme, 2000).



2.1.6.1 Fundamentos conceptuales y cálculo

La integral térmica y los grados días de desarrollo (GDD) constituyen conceptos fundamentales en la ciencia agrícola para comprender la influencia de las condiciones climáticas en el crecimiento y desarrollo de los cultivos (McMaster & Wilhelm, 1997; Bonhomme, 2000). Esta metodología representa una medida acumulativa de la energía térmica disponible para el crecimiento vegetal a lo largo del tiempo, mediante la suma de la energía calórica diaria recibida por el cultivo (McMaster & Wilhelm, 1997; Trudgill, 2005).

La fórmula básica se expresa como:

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

donde T_{max} y T_{min} son las temperaturas máximas y mínimas diarias del aire, respectivamente, y T_{base} corresponde a la temperatura mínima de desarrollo del cultivo (McMaster & Wilhelm, 1997). La selección de T_{base} es crítica, pues valores incorrectos pueden llevar a sobreestimaciones y errores en la comparación entre ambientes (Giolo et al., 2021).

Este enfoque ha sido ampliamente utilizado en agrometeorología y fenología, al permitir el estudio de los ciclos de vida vegetales en relación con la temperatura (Bonhomme, 2000).

2.1.6.2 Modelos que incorporan factores adicionales

Modelo de Unidades Fototérmicas (PTU)

Los modelos de unidades fototérmicas representan una extensión directa de los GDD mediante la incorporación del fotoperíodo como variable adicional a la ecuación básica de temperatura (McMaster & Wilhelm, 1997). Estos modelos reconocen la importancia primordial tanto de la temperatura como de la luz en la fenología de los cultivos, particularmente en ciertas etapas y cultivares específicos (McMaster & Wilhelm, 1997).



Modelo con Vernalización

Los modelos que incorporan vernalización abordan las limitaciones de los GDD tradicionales, especialmente en trigo de invierno, donde los modelos convencionales no predicen adecuadamente las etapas de crecimiento cercanas al ahijamiento debido a que no consideran los requerimientos de frío acumulado (McMaster, 1997).

Modelo de Tiempo Térmico Modificado

Estos modelos expanden la ecuación básica de GDD incorporando funciones para factores ambientales adicionales como agua, nutrientes, calidad de luz y concentraciones de CO₂ (McMaster 1997). También consideran la disponibilidad de recursos, condiciones fisiológicas de la planta y factores ecológicos como fotoperíodo, dormancia y diapausa (Trudgill, 2005).

Modelo de Simulación de Cultivos Integrados

Dentro de esta categoría se encuentran sistemas complejos como AquaCrop, que realiza simulaciones rutinariamente en tiempo térmico e incorpora estrés térmico y factores de respuesta a condiciones ambientales (Steduto et al., 2008); el modelo GreenLab, que integra radiación fotosintéticamente activa y arquitectura dinámica de plantas (de Reffye et al., 2016, en White, 2016); y el modelo Sirius, especializado en trigo con consideraciones específicas para altas temperaturas durante la floración (Semenov & Stratonovitch, 2015). Estos modelos mantienen la integral térmica como componente fundamental, pero la integran dentro de marcos predictivos significativamente más amplios y complejos.

La comprensión teórica de la integral térmica y el desarrollo de modelos predictivos sofisticados encuentra su aplicación práctica en el manejo cotidiano de los sistemas agrícolas (Bonhomme, 2000; Trudgill, 2005). La implementación efectiva de estos conceptos en las



operaciones de campo permite optimizar las prácticas de cultivo y maximizar la productividad (McMaster & Wilhelm, 1997).

2.1.6.3 Aplicaciones en manejo y optimización de cultivos

La integral térmica y los grados-día de desarrollo constituyen herramientas fundamentales para la toma de decisiones en el manejo agrícola, permitiendo la predicción y programación de prácticas específicas en función de las necesidades térmicas de los cultivos (Bonhomme, 2000; Trudgill, 2005).

Programación de siembra: Los GDD permiten a los agricultores predecir y programar las fechas óptimas de siembra mediante el análisis de las ventanas térmicas disponibles en diferentes regiones, maximizando así el aprovechamiento de las condiciones climáticas favorables y relacionándolas con las necesidades térmicas específicas de los cultivos (Bonhomme, 2000; Trudgill, 2005).

Manejo de la fertilización: La sincronización de aplicaciones de fertilizantes con etapas fenológicas específicas, predichas mediante acumulación de GDD, optimiza la eficiencia nutricional y permite una comprensión más profunda de los patrones de crecimiento y desarrollo de las plantas (Trudgill, 2005; Bonhomme, 2000).

Planificación de cosecha: La predicción de fechas de cosecha basada en GDD facilita la coordinación logística, la planificación de mano de obra y la optimización de la calidad del producto cosechado, mejorando así la productividad de los sistemas de producción (Bonhomme, 2000; McMaster & Wilhelm, 1997).

Estas métricas facilitan la optimización de las estrategias de manejo de cultivos al proporcionar un marco predictivo confiable para las principales operaciones agrícolas (Trudgill, 2005; McMaster & Wilhelm, 1997). Además, la integral térmica y los GDD pueden ser utilizados



en la investigación agrícola para desarrollar modelos de crecimiento de cultivos y evaluar el rendimiento potencial de nuevos genotipos y prácticas de manejo en diferentes condiciones climáticas (White, 2016; Semenov & Stratonovitch, 2015). Estos enfoques pueden ayudar a identificar estrategias de adaptación a las variaciones térmicas y contribuir a la seguridad alimentaria a nivel global (Semenov & Stratonovitch, 2015; Hatfield & Prueger, 2015).

No obstante, es importante recordar que estos cálculos no consideran otros elementos vitales para el desarrollo vegetal como la radiación solar, el agua y nutrientes (Bonhomme, 2000; McMaster & Wilhelm, 1997), por lo que deben integrarse dentro de sistemas de manejo más amplios y comprehensivos (Trudgill, 2005).

La aplicación de la integral térmica adquiere características particulares en sistemas de producción urbanos, donde las condiciones microclimáticas y las limitaciones espaciales requieren enfoques de manejo específicos y adaptados (Parent & Tardieu, 2012; Hatfield & Prueger, 2015).

2.1.6.4 Influencia en la producción de huertos urbanos

La integral térmica, también conocida como grados días de desarrollo (GDD), constituye un factor crítico en la producción en huertos urbanos, pues determina directamente la velocidad de crecimiento y desarrollo de las plantas (Parent & Tardieu, 2012). Cada especie presenta requerimientos térmicos específicos representados por rangos de temperatura mínima, máxima y óptima que, cuando se satisfacen adecuadamente, pueden optimizar la producción agrícola (Hatfield & Prueger, 2015; Trudgill, 2005). En este contexto, un manejo cuidadoso de la integral térmica permite a los productores predecir los tiempos óptimos de siembra y cosecha para maximizar la productividad mediante la determinación de fechas de plantación y cosecha basadas en la acumulación térmica (Trudgill, 2005; Miller, 2001).



La disponibilidad térmica en diferentes regiones puede variar significativamente dependiendo de diversos factores como la latitud, la altitud y las condiciones climáticas predominantes (Snyder, 2005; Trudgill, 2005). Por consiguiente, la integral térmica se constituye en un parámetro crucial para evaluar la viabilidad de diferentes regiones para el cultivo de ciertos tipos de plantas, permitiendo la optimización de ideotipos específicos para condiciones climáticas particulares (Calvache et al., 2021; Semenov & Stratonovitch, 2015). De este modo, los productores pueden emplear la integral térmica como una herramienta de pronóstico para identificar la disponibilidad térmica en lugares y los tiempos más adecuados para el cultivo de diversas hortalizas mediante la comparación de modelos predictivos de acumulación de grados día (Miller, 2001; Trudgill, 2005).

El cálculo y aplicación efectiva de la integral térmica también pueden ayudar a los productores agrícolas a adaptarse a las variaciones térmicas mediante el modelado de efectos del cambio climático y la optimización de estrategias de manejo (Trudgill, 2005; Semenov & Stratonovitch, 2015). Al proporcionar un medio para predecir los cambios en los patrones de crecimiento de las plantas en respuesta a las fluctuaciones de temperatura, la integral térmica constituye una herramienta esencial que permite a los productores anticiparse y prepararse para los desafíos planteados por el cambio climático mediante la corrección temporal para temperatura en condiciones fluctuantes (Parent et al., 2019; Calvache et al., 2021). Esto resulta particularmente relevante dado que las condiciones climáticas extremas y las temperaturas elevadas esperadas con las variaciones térmicas pueden tener un impacto significativo en la productividad agrícola (Hatfield & Prueger, 2015).



2.1.6.5 Apoyo a la investigación y desarrollo de nuevas variedades

Más allá de las aplicaciones en manejo de cultivos establecidos, la integral térmica constituye una herramienta fundamental en la investigación y desarrollo de nuevas variedades (White, 2016; Parent et al., 2019). La integral térmica y los GDD pueden ser utilizados en la investigación agrícola para desarrollar modelos de crecimiento de cultivos y evaluar el rendimiento potencial de nuevos genotipos y prácticas de manejo en diferentes condiciones climáticas (White, 2016; Parent et al., 2019). Estos enfoques pueden contribuir al desarrollo de nuevas variedades de cultivos y estrategias de adaptación al cambio climático mediante el diseño de ideotipos optimizados para condiciones ambientales específicas, lo que ayudará a garantizar la seguridad alimentaria a nivel global (Challinor et al., 2014; Semenov & Stratonovitch, 2015).

2.1.7 Emergía y transformicidad en agroecosistemas urbanos

Complementando el análisis térmico, la emergía y la transformicidad son conceptos desarrollados por el ecólogo Howard T. Odum. como parte de su teoría de los sistemas energéticos, constituyendo herramientas fundamentales para evaluar la sostenibilidad y eficiencia energética de los sistemas productivos (Odum, 1996; Brown & Ulgiati, 2004).

La emergía ha sido definida operacionalmente como la energía disponible de un tipo que ha sido utilizada, tanto directa como indirectamente, en el proceso de producción de un producto, mientras que la transformicidad mide cuánta emergía se requiere para generar una unidad de producto, indicando la posición jerárquica de un elemento en la escala termodinámica de la biosfera (Brown & Ulgiati, 2004; Campbell, 2024). Estos conceptos han sido aplicados extensivamente en diversos campos, incluyendo la agroecología, para comprender las dinámicas energéticas y evaluar la viabilidad de diferentes prácticas agrícolas (Agostinho et al., 2008; Avalos et al., 2021; Cavalett et al., 2006; Zhang et al., 2016).



La emergía (con "m") se refiere a la cantidad de energía disponible utilizada, tanto directa como indirectamente, para producir un bien o servicio, expresada en unidades de energía solar equivalente (seJ, solar emjoules) (Odum, 1996; Brown & Ulgiati, 2016). La transformicidad constituye un índice que mide la cantidad de emergía requerida para producir una unidad de energía en un sistema, funcionando como indicador de la calidad y eficiencia energética del mismo, donde una menor transformicidad para un producto equivalente indica un proceso de mayor eficiencia (Odum, 1996; Campbell & Lu, 2024). En el contexto de los agroecosistemas urbanos, estos conceptos adquieren particular relevancia para evaluar la autonomía energética y la sostenibilidad de sistemas productivos de pequeña escala, especialmente en sistemas familiares integrados que presentan alta renovabilidad, autosuficiencia y eficiencia en el uso de emergía (Agostinho et al., 2008; Avalos-Rangel et al., 2021; Cavalett et al., 2006; Lu & Campbell, 2009).

2.1.7.1 Fundamentos teóricos de la emergía y transformicidad

La emergía se entiende como la memoria de energía disponible (exergía) directa e indirectamente requerida para producir un bien o servicio, expresada en emjoules solares (seJ), distinguiéndose de la energía disponible presente por representar el trabajo energético realizado en el pasado (Odum, 1996; Campbell & Lu, 2024). Esta perspectiva permite colocar en una misma base de comparación recursos y procesos de distinta calidad y jerarquía energética, utilizando la energía solar como denominador común para expresar todos los flujos energéticos en una unidad equivalente (Odum, 1996; Brown & Ulgiati, 2004; Brown et al., 2016; Coscieme et al., 2014).

En términos operativos, la metodología emergética inicia con la representación del sistema mediante el lenguaje de sistemas energéticos desarrollado por Odum, seguida de la identificación de flujos y su cuantificación en unidades físicas (p. ej., J, g, US\$) para su posterior conversión a seJ mediante valores unitarios de emergía (UEV) que expresan la emergía por unidad de recurso



(Odum, 1996; Agostinho et al., 2008; Avalos-Rangel et al., 2021). A escala de producto o proceso, la emergía del producto se obtiene como la suma de todos los flujos convertidos a equivalentes solares, donde Q_i representa la magnitud del flujo i y UEV_i su correspondiente valor unitario de emergía (Odum, 1996; Brown & Ulgiati, 2004):

$$Y = \sum_{i=1}^n Q_i UEV_i$$

donde Q_i representa la magnitud del flujo i (en sus unidades nativas) y UEV_i su correspondiente valor unitario de emergía (p. ej., seJ/J, seJ/g) (Odum, 1996; Brown & Ulgiati, 2004).

De acuerdo con Agostinho (2008) y Avalos-Rangel (2021) a escala sistémica, las entradas se agrupan convencionalmente en renovables locales (R), no renovables locales (N) y compradas (F), de modo que:

$$U = R + N + F$$

Es importante mantener la coherencia de escala en la interpretación de símbolos: Y puede denotar tanto la emergía total de entrada del sistema como, en contextos específicos de procesos, la emergía del producto generado; U representa consistentemente el uso total de emergía del sistema (Agostinho et al., 2008; Campbell, 2012; Avalos-Rangel et al., 2021). La transformicidad cuantifica la calidad energética de un producto como emergía por unidad de emergía disponible del producto (Brown & Ulgiati, 2004; Campbell & Garmestani, 2012):

$$\tau = \frac{Y}{E_p} \quad [\text{seJ/J}]$$

En términos generales, el UEV de un producto X se expresa como:

$$UEV_x = \frac{Y}{X}$$



lo que admite casos particulares como transformicidad (si $\mathbf{X} = \mathbf{E}_p$, en sej/J) o emergía específica (si \mathbf{X} es masa, en sej/g) (Brown & Ulgiati, 2004). Cuando existe coproducción, la transformicidad coherente del conjunto se obtiene dividiendo la emergía total entre la suma de las energías disponibles de todas las salidas (Campbell & Garmestani, 2012):

$$\tau_{co} = \frac{Y}{\sum_k E_{p,k}}$$

Para asegurar comparabilidad entre estudios, es necesario declarar la línea base geobiosférica de emergía (**GEB**) adoptada y ajustar los **UEV** tomados de fuentes con líneas base distintas (Brown et al., 2016; Avalos-Rangel et al., 2021).

Indicadores energéticos derivados (definiciones)

A partir de **R**, **N**, **F**, **U** y del rendimiento de emergía **Y**, se utilizan habitualmente los siguientes indicadores (Odum, 1996; Brown & Ulgiati, 2004; Avalos-Rangel et al., 2021):

$$\%R = \frac{R}{U} \times 100$$

$$EYR = \frac{Y}{F}$$

$$ELR = \frac{N + F}{R}$$

$$ESI = \frac{EYR}{ELR}$$

Estos índices permiten caracterizar, respectivamente, la fracción renovable del uso de emergía, la capacidad del sistema para explotar recursos locales mediante inversión comprada, la presión ambiental generada por recursos no renovables y comprados sobre los renovables, y una medida compuesta de sostenibilidad que integra rendimiento y carga ambiental (Avalos-Rangel et al., 2021; Brown & Ulgiati, 2004; Lu & Campbell, 2009).



Definiciones de símbolos: Q_i : magnitud física del flujo i . UEV_i : valor unitario de energía del flujo i . Y : energía del producto (sej). U : uso total de energía del sistema (sej). R : entradas renovables locales (sej). N : entradas no renovables locales (sej). F : entradas compradas (sej). E_p : energía disponible del producto (J). τ : transformicidad (sej/J).

Para evitar ambigüedades, se diferencia claramente entre Y (energía del producto, seJ) cuando se refiere a análisis energético, y Y (rendimiento, kg/planta) en el contexto del modelo SFA. La variable U representa consistentemente el uso total de energía del sistema (seJ), siguiendo la convención de la literatura base (Odum, 1996; Brown & Ulgiati, 2004).

2.1.7.2 Energía como indicador de eficiencia

La energía constituye una medida comprensiva de los inputs totales del sistema que trasciende las limitaciones de los análisis energéticos convencionales al reconocer que es inválido utilizar joules de un tipo de energía como equivalentes a joules de otro para evaluar contribuciones, incorporando tanto flujos renovables como no renovables, así como la contribución del trabajo humano y los servicios ecosistémicos gratuitos como luz solar, viento y lluvia (Odum, 1996; Brown et al., 2016; Avalos-Rangel et al., 2021; Raugei et al., 2014). Esta característica la convierte en un indicador particularmente útil para evaluar la eficiencia de sistemas productivos complejos donde múltiples tipos de recursos interactúan mediante bucles autocatalíticos que refuerzan la entrada de energía y su uso eficiente, permitiendo establecer comparaciones entre escenarios y servir de apoyo para la gestión (Odum, 1996; Cavalett et al., 2006; Pan et al., 2021; Álvarez-Lima et al., 2020).

La transformicidad funciona como un proxy de eficiencia técnica al medir la cantidad de energía requerida para generar una unidad de producto, donde una menor transformicidad indica un proceso de mayor eficiencia ecológica y refleja tanto la eficiencia en el uso de recursos como



la calidad energética y posición jerárquica del proceso productivo (Zhang et al., 2016; Odum, 1996; Cavalett et al., 2006; Campbell, 2024). La relación entre eficiencia emergética y eficiencia económica se fundamenta en el principio de que sistemas con menor transformicidad tienden a presentar ventajas comerciales y mayor autosuficiencia económica al requerir menores inputs energéticos por unidad de output (Cavalett et al., 2006; Álvarez-Lima et al., 2020; Avalos-Rangel et al., 2021).

La metodología emergética se fundamenta teóricamente en su capacidad para contabilizar tanto el valor ambiental como el económico bajo una unidad común, capturando la totalidad de los recursos utilizados en un proceso productivo, incluyendo inputs no monetizados y contribuciones ambientales que tradicionalmente no considera la economía clásica (Álvarez-Lima et al., 2020; Pan et al., 2021; Lu & Campbell, 2009). La aplicabilidad de esta metodología en la evaluación de sistemas productivos ha sido ampliamente demostrada a través de su implementación en análisis de sostenibilidad a múltiples escalas, actuando como herramienta integral que permite expresar flujos disparatados de energía, materiales e información en una base común que facilita comparaciones directas (Campbell, 2012; Raugei et al., 2014; Brown & Ulgiati, 2004).

2.1.7.3 Aplicaciones en sistemas agrícolas

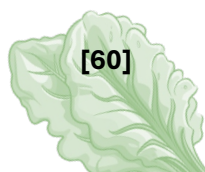
La aplicación de análisis emergético en sistemas agrícolas ha demostrado su utilidad para evaluar la sostenibilidad y eficiencia de diferentes prácticas de manejo (Agostinho et al., 2008; Cavalett et al., 2006; Zhang et al., 2016), proporcionando una perspectiva holística que integra dimensiones ambientales, energéticas y económicas mediante una metodología de base científica que contabiliza tanto el valor ambiental como el económico bajo una unidad común (Álvarez-Lima et al., 2020; Avalos-Rangel et al., 2021; Lu & Campbell, 2009). Brown y Ulgiati (2004) establecieron el marco teórico conceptual para utilizar emergía y transformicidad como ventana



para investigar sistemas desde una perspectiva del lado del donante, argumentando que estos conceptos proporcionan una perspectiva más completa y sistemática que indicadores tradicionales de sostenibilidad al considerar el trabajo ambiental requerido para soportar la dinámica del sistema.

La metodología emergética desarrollada por Odum (1996) para analizar emergía y transformicidad incluye cuatro etapas fundamentales: diseño del diagrama de sistema, tabla de evaluación emergética, cálculo de indicadores emergéticos y aplicación del principio de máxima potencia (Álvarez-Lima et al., 2020), el cual proporciona un criterio termodinámicamente controlado que rige el comportamiento de todos los sistemas (Campbell, 2024). Esta metodología ha sido aplicada exitosamente en diversos contextos, como el estudio de Ortega et al. (2005) sobre eficiencia energética en producción de soja en Brasil, demostrando que el análisis emergético puede identificar áreas de mejora (Cavalett et al., 2006; Agostinho et al., 2008) y orientar decisiones de gestión agrícola más informadas al servir de apoyo para la gestión y evaluación de sostenibilidad (Avalos-Rangel et al., 2021).

Los estudios comparativos entre sistemas agrícolas convencionales y agroecológicos utilizando criterios emergéticos han revelado que los sistemas agroecológicos frecuentemente exhiben mayor eficiencia emergética debido a su menor dependencia de inputs externos de alta transformicidad (Agostinho et al., 2008; Avalos-Rangel et al., 2021), utilizando una mayor proporción de recursos libres en comparación con recursos comprados y mostrando mayor capacidad de transformación de energía potencial (Cavalett et al., 2006). La emergía también se ha utilizado como herramienta analítica para evaluar el impacto de políticas públicas en la sostenibilidad y eficiencia energética de sistemas agrícolas (Odum, 1996; Cavalett et al., 2006), contribuyendo a la formulación de políticas más efectivas mediante la maximización de emerpotencia como criterio de selección de alternativas (Odum, 1996) y alineándose con objetivos



de desarrollo sostenible según las recomendaciones de la Agenda 21 (Álvarez-Lima et al., 2020; Avalos-Rangel et al., 2021).

2.1.7.4 Emergía en huertos urbanos familiares

La agricultura urbana presenta características emergéticas que la diferencian de la agricultura rural convencional, debido principalmente a la alta disponibilidad de recursos reciclables generados en las ciudades, la proximidad a mercados locales y la posibilidad de integrar sistemas de manejo de residuos que reducen la dependencia de insumos externos (Pan et al., 2021; Lu & Campbell, 2009). Estas particularidades permiten que los huertos urbanos se beneficien de recursos renovables de bajo costo y, en consecuencia, muestren mayor eficiencia emergética que los sistemas agrícolas convencionales.

En el contexto latinoamericano, los huertos urbanos familiares adquieren una relevancia particular al sustentarse en condiciones climáticas favorables (alta radiación solar y regímenes estacionales de precipitación) y en prácticas agroecológicas que privilegian el uso de recursos locales frente a insumos externos (Avalos et al., 2021; Agostinho et al., 2008). Estos sistemas dependen en gran medida del trabajo familiar no remunerado y del conocimiento tradicional, lo que les otorga mayor autosuficiencia y eficiencia emergética en comparación con sistemas intensivos urbanos en otras regiones (Zhang et al., 2016; Lu & Campbell, 2009). La combinación de factores biofísicos y socioeconómicos convierte a los huertos familiares en un referente para comprender cómo la emergía puede fortalecer la autonomía energética y la resiliencia de sistemas agroalimentarios en ciudades intermedias.



2.1.8 Fronteras estocásticas de producción (SFA)

2.1.8.1 Integración de emergía en modelos de eficiencia productiva

La integración de emergía como variable input en funciones de producción se fundamenta teóricamente en su capacidad para representar de manera comprensiva la totalidad de recursos energéticos utilizados en el proceso productivo, superando las limitaciones de variables económicas tradicionales que no capturan completamente el costo energético real de la producción. Odum (1996) establece que "la emergía evalúa el trabajo previamente realizado para hacer un producto o servicio", mientras que Alvarez-Lima et al. (2020) señalan que "algunos flujos involucrados en los procesos agrarios, como es el caso de las contribuciones de la naturaleza, no son considerados por la Economía Clásica al definir los precios de mercado". La relación teórica entre eficiencia energética y eficiencia técnica se establece a través del reconocimiento de que la minimización de inputs energéticos por unidad de output se correlaciona positivamente con la eficiencia en el uso de recursos, ya que "con el mismo output, el sistema con una menor transformidad es ecológicamente más eficiente" (Chen, 2006) y "cuando el valor EIR es más alto, la producción aumenta, pero la emergía se usa menos eficientemente" (Avalos-Rangel et al., 2021).

La justificación para incluir emergía en modelos de frontera estocástica se fundamenta en precedentes exitosos de integración de variables energéticas y ambientales en análisis econométricos de eficiencia productiva. Reinhard et al. (1999) demuestran que la inclusión de variables ambientales como el excedente de nitrógeno en modelos de frontera estocástica permite que "la medida de eficiencia ambiental puede añadir información independiente" al capturar aspectos del desempeño productivo no reflejados en variables económicas tradicionales. Färe et al. (1989) establecen el marco teórico para incluir "efectos ambientales como productos indeseables" en funciones de producción, desarrollando medidas de eficiencia que evalúan el



desempeño del productor considerando externalidades ambientales. Gadanakis et al. (2015) confirman que la inclusión de métricas energéticas mejora la capacidad predictiva de los modelos mediante el desarrollo de herramientas que consideran "los costos relacionados con la protección de cultivos, el combustible de la maquinaria y la energía" como presiones ambientales, estableciendo precedente metodológico que justifica la integración de energía como variable input en modelos de frontera estocástica.

La aproximación metodológica propuesta permite que el análisis de frontera estocástica integre la eficiencia energética total del sistema mediante la energía, que cuantifica "las diferentes contribuciones de flujos energéticos (naturaleza y economía) bajo una unidad común, el emjoule solar" (Alvarez-Lima et al., 2020). Esta integración proporciona un marco analítico donde variables que tradicionalmente se analizan de forma independiente convergen en una evaluación integral de la eficiencia productiva, ya que la metodología energética "contabiliza el valor ambiental y el valor económico" y permite "conocer la eficiencia de los sistemas en el uso de los recursos" (Alvarez-Lima et al., 2020). Reinhard (1999) establece que el análisis de frontera estocástica proporciona un marco para desarrollar medidas de eficiencia ambiental que identifican "las granjas con las menores y las mayores emisiones ambientalmente perjudiciales para el medio ambiente", donde la inclusión de variables energéticas permite identificar fuentes específicas de ineficiencia que "algunos flujos involucrados en los procesos agrarios, como es el caso de las contribuciones de la naturaleza, no son considerados por la Economía Clásica" (Alvarez-Lima et al., 2020), estableciendo así una metodología que unifica diferentes aproximaciones energéticas en un modelo coherente de eficiencia productiva.



2.1.8.2 Definición y fundamentos de la frontera estocástica

El modelo de frontera estocástica de producción (SFA) surge como una respuesta a las limitaciones de los enfoques determinísticos, los cuales interpretaban cualquier desviación de la frontera como ineficiencia pura, sin reconocer la presencia de errores de medición ni de variabilidad externa al control del productor (Aigner, Lovell, & Schmidt, 1977; Coelli, Rao, O'Donnell, & Battese, 2005).

La innovación metodológica de la SFA consiste en introducir un término de error compuesto que separa dos fuentes de variación: el ruido aleatorio y la ineficiencia técnica. De manera formal, la especificación básica se presenta como:

$$\ln Y_i = x_i' \beta + v_i - u_i$$

donde Y_i corresponde a la producción observada de la unidad i , $x_i' \beta$ representa la frontera determinística, v_i es un término de error aleatorio simétrico, y u_i refleja la ineficiencia técnica (Kumbhakar & Lovell, 2000).

Cada componente cumple un papel específico. El término v_i , modelado como una variable aleatoria con distribución normal de media cero, recoge choques externos, errores de medición y fluctuaciones estadísticas. En contraste, u_i se define como una variable no negativa, responsable de cuantificar la distancia entre la producción real y la frontera máxima posible, mostrando que la ineficiencia solo puede reducir el nivel de producción (Meeusen & van den Broeck, 1977). Esta separación permite distinguir entre deficiencias atribuibles al productor y factores no controlables, lo que constituye la principal fortaleza del enfoque.

La evolución del modelo ha estado ligada a los supuestos sobre la distribución de u_i . Inicialmente se plantearon formas semi-normales y exponenciales; sin embargo, estudios posteriores introdujeron distribuciones más flexibles, como la normal truncada y la gamma, que



permiten una mejor adaptación a distintos contextos y bases de datos (Battese & Coelli, 1995; Greene, 2005).

Finalmente, la SFA establece que ninguna unidad productiva puede superar sistemáticamente la frontera de producción. Esto implica que la función de producción constituye el máximo técnico alcanzable y que cualquier observación “superior” se explica únicamente por el componente aleatorio positivo v_{i^*} , nunca por una eficiencia más allá del límite teórico (Fried, Lovell, & Schmidt, 2008; Kumbhakar et al., 2022).

2.1.8.3 Eficiencia técnica, económica y asignativa

La tipología de eficiencia propuesta por Farrell (1957) establece tres dimensiones clave del desempeño productivo: eficiencia técnica, eficiencia asignativa y eficiencia económica. Esta descomposición ha sido ampliamente utilizada para analizar la productividad en distintos sistemas de producción.

Eficiencia Técnica (ET).

La eficiencia técnica mide la capacidad de una unidad productiva para transformar insumos en la máxima cantidad posible de producto, dada una tecnología determinada. Se define como la razón entre el nivel observado de producción y el nivel de frontera:

$$ET_i = \frac{Y_i}{Y_i^f}$$

donde Y_i es la producción efectiva y Y_i^f la producción potencial en la frontera. Su valor se encuentra entre 0 y 1, indicando proximidad a las mejores prácticas. Esta eficiencia puede evaluarse con orientación a insumos —minimizando el uso de recursos para un nivel de producto dado— o con orientación a producto —maximizando el producto con insumos fijos— (Fried, Lovell, & Schmidt, 2008).



Eficiencia Económica (EE) y Asignativa (EA).

La eficiencia económica integra tanto la eficiencia técnica como la capacidad de asignar insumos de acuerdo con sus precios relativos. Farrell (1957) demostró que puede expresarse como la combinación de eficiencia técnica y eficiencia asignativa:

$$EE = ET \times EA$$

La eficiencia asignativa refleja la habilidad del productor para elegir proporciones óptimas de insumos considerando sus precios y la tecnología disponible (Coelli, Rao, O'Donnell, & Battese, 2005). Así, un productor puede ser técnicamente eficiente, pero asignativamente ineficiente si, pese a operar en la frontera física, no ajusta correctamente la mezcla de insumos según las señales de precios.

Eficiencia de Escala.

Complementariamente, la eficiencia de escala evalúa si una unidad productiva opera en el tamaño óptimo. Incluso si se es técnicamente eficiente, la productividad puede no ser máxima si la escala de operación se encuentra por debajo o por encima de la óptima (Battese & Coelli, 1995).

En síntesis, la descomposición de Farrell permite distinguir entre tres niveles de desempeño: el uso eficiente de los recursos disponibles (ET), la correcta combinación de insumos en función de los precios (EA), y la integración de ambos aspectos en la eficiencia económica total (EE). Esta estructura proporciona una herramienta robusta para identificar fuentes de ineficiencia y orientar políticas que promuevan mejoras productivas en distintos contextos.

2.1.8.4 Aplicaciones en agricultura y sistemas urbanos

En los huertos urbanos de Puebla, las fronteras estocásticas de producción constituyen un marco analítico que permite integrar simultáneamente factores biofísicos, energéticos y socioeconómicos para medir la eficiencia productiva. Este enfoque es especialmente pertinente en



contextos urbanos, donde la heterogeneidad de prácticas de manejo, el tamaño reducido de las parcelas y el acceso diferenciado a recursos generan variabilidad en los resultados de producción (Coelli, Rao, O'Donnell, & Battese, 2005).

La aplicación de la SFA en este contexto se sustenta en la incorporación de variables clave: la superficie cultivada, el trabajo familiar, la disponibilidad y manejo del agua, el uso de bioinsumos y compostas, así como las condiciones térmicas que determinan el potencial de crecimiento de los cultivos. A ello se añaden variables socioeconómicas como la experiencia, la educación de los productores y la localización de los huertos, que influyen en la gestión y en la adopción de prácticas agroecológicas. De esta manera, el modelo permite cuantificar no solo la eficiencia técnica derivada del uso de insumos, sino también el efecto de factores estructurales y contextuales propios de la ciudad de Puebla (Aigner, Lovell, & Schmidt, 1977; Meeusen & van den Broeck, 1977; Coelli et al., 2005).

La distinción entre eficiencia técnica y eficiencia económica es central para el análisis. La eficiencia técnica refleja la capacidad de los huertos para transformar insumos en producción hortícola, mientras que la eficiencia económica incorpora los precios de insumos y productos, revelando si los recursos son utilizados en proporciones óptimas para maximizar beneficios. En el caso poblano, esta diferenciación permite reconocer huertos que, aunque productivamente eficientes, podrían enfrentar limitaciones de rentabilidad por dependencia de insumos externos o por restricciones de mercado (Coelli et al., 2005).

En síntesis, la frontera estocástica de producción ofrece una herramienta para identificar brechas de eficiencia, evaluar la sustentabilidad de los huertos urbanos y orientar estrategias que fortalezcan tanto la autosuficiencia alimentaria como el aprovechamiento óptimo de recursos locales en Puebla.



2.1.8.5 Incorporación de variables ambientales en modelos SFA

El marco tradicional de las fronteras estocásticas de producción (SFA) ha sido ampliado en la literatura para incorporar determinantes de la ineficiencia asociados al entorno, con el fin de superar la limitación de atribuir toda la ineficiencia únicamente a factores internos de la firma. Kumbhakar, Ghosh y McGuckin (1991) formalizaron este enfoque inicial, demostrando que las características ambientales pueden influir en la distribución del término de ineficiencia. Posteriormente, Battese y Coelli (1995) extendieron el modelo a datos de panel, lo que permitió analizar la variación temporal de la ineficiencia y la influencia de factores externos sobre el desempeño técnico. Greene (2005) también aportó al desarrollo de especificaciones más flexibles para capturar los efectos de variables contextuales en la ineficiencia.

En este sentido, la literatura reconoce que las variables ambientales y biofísicas constituyen determinantes relevantes de la eficiencia, al reflejar condiciones exógenas que condicionan el uso de recursos y la productividad agrícola (Kumbhakar & Lovell, 2000; Battese & Coelli, 1995; Greene, 2005). Esta línea de trabajo ha consolidado un cuerpo teórico que justifica la integración de variables no convencionales en los modelos de eficiencia técnica, abriendo paso a la incorporación de factores ecológicos, climáticos y energéticos en la frontera estocástica de producción.

2.1.9 Huertos urbanos en la ciudad de Puebla

2.1.9.1 Antecedentes y situación actual de los huertos urbanos en Puebla

El concepto de los huertos urbanos ha cobrado relevancia en las últimas décadas debido a la necesidad creciente de sustentabilidad y sostenibilidad en las ciudades, el deseo de seguridad alimentaria y la búsqueda de mejoras en la salud mental y física de las personas (Okvat & Zautra, 2011). Los huertos urbanos pueden tener múltiples formas, desde jardines comunitarios hasta



agricultura en terrazas, y pueden tener varios propósitos, desde la producción de alimentos hasta la educación ambiental y la unión comunitaria (Mougeot, 2000).

En el caso de Puebla, Puebla, México, la urbanización y el gradual aumento en la población ha llevado a un creciente interés en la agricultura urbana y periurbana. El área metropolitana de Puebla, con aproximadamente 1.69 millones de habitantes, ha experimentado una rápida expansión urbana que ha generado cambios profundos en el uso del suelo y presión en las redes alimentarias locales. Los resultados de encuestas indican que alrededor del 70% de las familias poblanas tiene un interés alto en cultivar sus propios alimentos, cifra que incrementó a casi 73% en 2020 (Muñoz Nuñez et al., 2022).

2.1.9.2 Programas de fomento de huertos urbanos en Puebla y alrededores

El fomento institucional de huertos urbanos en Puebla se ha formalizado a través de programas diseñados para atender tanto la seguridad alimentaria como la cohesión social. Un ejemplo clave son los Lineamientos para el Funcionamiento del Programa de Huertos urbanos familiares, cuyo propósito es entregar huertos familiares en espacios domésticos, con el fin de mejorar la nutrición, promover la participación comunitaria y transformar el entorno urbano bajo un enfoque agroecológico (Gobierno de Puebla, 2021). Este programa focaliza su intervención en hogares de juntas auxiliares, colonias y unidades habitacionales del municipio de Puebla, consolidando un marco de acción que vincula la producción alimentaria con la superación de la carencia alimentaria.

De manera complementaria, la política pública se fortaleció con la publicación del Manual de Agricultura Urbana, elaborado por la Secretaría de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial. Este documento no solo difunde conocimientos técnicos para la producción de alimentos sanos en espacios urbanos y periurbanos, sino que además articula su



propuesta con la Ley de Agricultura Urbana para el Estado de Puebla (2013). Dicho marco legal busca integrar el aprovechamiento de espacios disponibles en zonas urbanas con estrategias de inclusión social y sustentabilidad, promoviendo la autoproducción y la mejora del hábitat (Secretaría de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial, 2022).

En la zona metropolitana, los esfuerzos se han diversificado hacia el fortalecimiento de redes comunitarias y proyectos colectivos. Destaca el trabajo impulsado por Conahcyt en torno al Fortalecimiento y habilitación de redes e iniciativas alimentarias de producción y consumo local, que integra a actores de la economía social y solidaria en el área Puebla–Tlaxcala (Ibarra Mateos, 2024). Estos proyectos no solo promueven la producción, sino también el consumo responsable y la organización social como ejes para consolidar un modelo alternativo de agricultura urbana.

El registro sistemático de experiencias también ha permitido dimensionar el alcance de estas iniciativas. En dos encuentros regionales de agricultura urbana realizados en 2015 y 2019, se identificaron más de noventa huertos en la zona metropolitana de Puebla, de los cuales la mayoría correspondía a huertos familiares, educativos y vecinales (García Bustamante, 2024). Estos espacios cumplen funciones productivas, pero también educativas y culturales, reforzando el papel de la agricultura urbana como estrategia de sostenibilidad urbana.

Asimismo, la participación comunitaria ha dado lugar a proyectos colectivos que evidencian creatividad y compromiso ambiental. Ejemplo de ello es el establecimiento de invernaderos con materiales reciclados, la producción de composta a partir de residuos de mercados y la reforestación comunitaria en el cerro de Amalucan, lo que demuestra una visión integral de la agricultura urbana en Puebla (Olvera Cuessy, Islas Amador, Chávez Castillo, & Guerrero Morales, 2024). Estos casos confirman que el fomento de huertos urbanos trasciende la



producción de alimentos, generando procesos de aprendizaje social, restauración ecológica y resiliencia urbana.

La institucionalidad académica también ha reforzado este panorama mediante iniciativas como el Jardín Botánico Universitario de la BUAP y el Módulo de Investigación y Demostración en Agricultura Urbana del Colegio de Postgraduados, Campus Puebla. Ambos espacios han funcionado como plataformas para la capacitación técnica y la experimentación científica, con el fin de transferir conocimiento hacia comunidades y municipios cercanos (Parra Suárez, Marín Torres, & Rodríguez Acosta, 2024; Aguirre Álvarez & Paredes Sánchez, 2024). De esta manera, se articula un entramado de acciones estatales, comunitarias y académicas que posicionan a Puebla como un referente en programas de fomento a la agricultura urbana en México.

2.1.9.3 Estudios de caso y buenas prácticas en huertos urbanos familiares

En Puebla, la política pública ha sido un eje relevante en la consolidación de huertos urbanos familiares como estrategia de seguridad alimentaria y bienestar social. Los Lineamientos para el Funcionamiento del Programa de Huertos urbanos familiares establecen objetivos claros para fomentar la autoproducción alimentaria mediante técnicas agroecológicas, al mismo tiempo que fortalecen la integración comunitaria y promueven la recuperación de espacios urbanos. Este programa propone modalidades de producción adaptables a entornos domésticos, incluyendo huertos en cajas, macetas e hidroponía vertical, además de iniciativas innovadoras como las “Farmacias Vivas” orientadas al rescate de plantas medicinales tradicionales (Gobierno de Puebla, 2021, 2022). Estas acciones reflejan una visión integral donde los huertos se convierten en dispositivos de salud, resiliencia social y educación ambiental.

Los estudios de caso documentados en la zona metropolitana de Puebla revelan una diversidad de prácticas y aprendizajes sociales vinculados a la agricultura urbana. Guerrero y Silva



(2024) caracterizan experiencias que van desde un invernadero improvisado en Bosques de San Sebastián hasta huertos biointensivos en azoteas y proyectos con ecotecnias que incluyen gallinas y sistemas de captación de agua pluvial. Estos ejemplos muestran cómo los huertos no solo aportan alimentos saludables, sino también beneficios ambientales al mitigar islas de calor y facilitar la infiltración de agua, además de fortalecer la identidad cultural y la conciencia ecológica de los practicantes. Así, los huertos urbanos en Puebla trascienden lo productivo para convertirse en herramientas de regeneración socioambiental.

La evidencia científica respalda también la eficiencia de los huertos urbanos en términos de sostenibilidad técnica y económica. Muñoz-Nuñez et al. (2025) demostraron que estos sistemas pueden igualar el rendimiento de la agricultura convencional mientras reducen significativamente el consumo de agua y optimizan los ciclos de nutrientes. En paralelo, Muñoz Nuñez, Romero Arenas y Huerta Lara (2022) subrayan que más de 300 familias poblanas han manifestado interés en cultivar alimentos en sus hogares, destacando motivaciones como la búsqueda de alimentos inocuos, la reducción del estrés urbano y el fortalecimiento de vínculos sociales. Estos hallazgos consolidan a los huertos familiares como una práctica resiliente frente a los desafíos urbanos contemporáneos.

En el ámbito comunitario, el libro *Agricultura Urbana y Periurbana en Puebla* compila múltiples experiencias de familias y colectivos que han convertido patios, azoteas y espacios compartidos en huertos productivos. Entre los casos más representativos se encuentra El Huerto de Isabel, motivado por la resistencia a los transgénicos (De la Serna Cruz, 2024), así como las experiencias de familias en colonias urbanas como Adolfo López Mateos y Minerales de Guadalupe Sur, apoyadas por programas de capacitación técnica (Aguilar Méndez et al., 2024; Osorio Arellano, 2024). Estos relatos evidencian que, además de proveer alimentos, los huertos



han fortalecido la organización comunitaria, la transmisión de saberes y el desarrollo de capacidades locales para la sustentabilidad.

La literatura mexicana y latinoamericana amplía la perspectiva al mostrar cómo los huertos urbanos familiares han sido implementados exitosamente en contextos metropolitanos más amplios, como la Ciudad de México con las chinampas de Xochimilco y los huertos colectivos urbanos (Guzman et al., 2020; Arroyo-Lambaer et al., 2022). A nivel internacional, experiencias en Rosario, La Habana y Belo Horizonte se han convertido en referentes globales de buenas prácticas, demostrando que los huertos urbanos pueden ser políticas estructurales contra la pobreza y la inseguridad alimentaria (Lattuca, 2019; Urías Borbón & Ochoa de la Torre, 2020). En conjunto, estos casos consolidan la visión de los huertos familiares como una herramienta versátil y estratégica para enfrentar desafíos socioambientales en distintas geografías.

2.1.9.4 Políticas públicas y estrategias para fomentar la creación de huertos urbanos

Diversas ciudades han implementado políticas que promueven la agricultura y los huertos urbanos como parte de sus estrategias de desarrollo sostenible, reconociendo que la agricultura urbana representa una actividad con potencial para contribuir al desarrollo sustentable de las ciudades (Losada, 2015; Orsini et al., 2013).

Estas políticas incluyen la asignación de terrenos para huertos comunitarios, como en Rosario, Argentina, donde más de 450 hectáreas de lotes baldíos ubicados en la periferia fueron repartidos para uso permanente como huertos urbanos, y en Puebla, donde el programa de Huertos urbanos familiares busca entregar huertos de manera focalizada a hogares con espacio físico disponible (Urías Borbón & Ochoa De La Torre, 2020; Gobierno de Puebla, 2021).



Adicionalmente, estas estrategias comprenden la flexibilización de regulaciones relacionadas con el uso de la tierra, como en Bulawayo, Zimbabue, donde se adaptaron leyes eliminando restricciones para la producción agrícola en entornos urbanos, y la provisión de recursos y financiamiento, ejemplificado por el Urban Agriculture Resilience Program que ha otorgado \$1.57 millones a 80 colaboraciones en 30 estados (Urías Borbón & Ochoa De La Torre, 2020; USBG & APGA, 2024).

2.2 Marco legal y normativo

En México, los huertos urbanos han comenzado a incorporarse en el marco jurídico como parte de las políticas para fortalecer la seguridad alimentaria, la sostenibilidad y la cohesión social. Esta incorporación se refleja en lineamientos municipales, leyes estatales y reformas que regulan su implementación y promueven su práctica bajo enfoques agroecológicos. En particular, destacan los instrumentos normativos emitidos en Puebla y la Ciudad de México, donde se han establecido reglas, programas y apoyos para incentivar la producción alimentaria en entornos urbanos y periurbanos, al mismo tiempo que se fomenta la educación ambiental y la participación comunitaria (Gobierno de Puebla, 2021; Urías Borbón & Ochoa de la Torre, 2020).

2.2.1 Lineamientos para el funcionamiento del programa de huertos urbanos familiares en Puebla

Los Lineamientos para el funcionamiento del Programa de Huertos urbanos familiares del municipio de Puebla establecen como objetivo principal contar con un instrumento normativo que defina las disposiciones operativas para ejecutar el programa utilizando los recursos económicos, materiales y humanos asignados de manera óptima, eficaz, eficiente y transparente (Ayuntamiento de Puebla, Secretaría de Bienestar, 2021).

El objetivo general del programa consiste en entregar huertos urbanos familiares de manera focalizada con el fin de promover el bienestar familiar a través de la producción de alimentos destinados al consumo familiar mediante la aplicación de técnicas agroecológicas, contribuyendo a la integración social, la superación de la carencia alimentaria, el mejoramiento del hábitat y del entorno urbano. Los lineamientos establecen que los huertos urbanos familiares se definen como estructuras metálicas destinadas al cultivo urbano de hortalizas de manera intensiva y continua a escala doméstica, dirigidas a hogares ubicados en juntas auxiliares, inspectorías, colonias, barrios y unidades habitacionales del municipio de Puebla (Ayuntamiento de Puebla, Secretaría de Bienestar, 2021).

2.2.2 Ley de Agricultura Urbana para el Estado de Puebla (2013)

Promulgada mediante decreto del Honorable Congreso del Estado en 2013, es una normativa de interés público y observancia general que tiene por objeto mejorar la calidad de vida de las personas a través del fomento de la agricultura urbana y periurbana. Este objetivo se alcanza mediante la promoción de la autoproducción alimentaria y el desarrollo de la agricultura mediante el aprovechamiento y uso de espacios urbanos y periurbanos, así como el fortalecimiento de la participación familiar y comunitaria a través de la organización e inclusión social (Gobierno del Estado de Puebla, 2013).

La Secretaría se coordinará con instituciones de educación superior para promover la investigación científica y tecnológica, y fomentará programas de formación, capacitación y asistencia técnica en actividades de producción, transformación, almacenamiento y comercialización de productos, así como la implementación de techos verdes y sistemas de terrazas para captación de agua de lluvia (Gobierno del Estado de Puebla, 2013).



2.2.3 Iniciativa de reforma a la Ley de Desarrollo Social en Puebla (2025)

La iniciativa presentada por el diputado Rosalío Zanatta Vidaurri, integrante del Grupo Legislativo de Movimiento de Regeneración Nacional, ante la LXII Legislatura del Honorable Congreso del Estado Libre y Soberano de Puebla, tiene como propósito reformar el acápite del artículo 2 Bis de la Ley de Desarrollo Social. Esta propuesta se fundamenta en la necesidad de actualizar el marco normativo estatal con un enfoque moderno, integral y sustentable, centrado en los derechos humanos.

Entre los principales argumentos expuestos, se señala que Puebla es una de las entidades con mayores contrastes sociales, ya que más del 54% de su población vive en situación de pobreza y una parte significativa en pobreza extrema. Asimismo, se subraya la urgencia de superar un modelo asistencialista y transitar hacia una política social transformadora, que no se limite a contener la pobreza, sino que atienda sus causas estructurales.

Esta propone establecer que la Política de Desarrollo Social del Estado sea entendida como el conjunto de programas, proyectos y acciones orientados a reducir las brechas de desigualdad, la pobreza, el rezago y la exclusión sociales, garantizando al mismo tiempo el desarrollo sostenible y la consolidación de la igualdad social. Con ello, se busca alinear la legislación estatal con las mejores prácticas nacionales e internacionales, así como con la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.

El proyecto de decreto establece que el nuevo texto del artículo 2 Bis defina expresamente esta concepción de política social, la cual deberá sujetarse a los principios previamente señalados en la ley. El documento concluye que el decreto entrará en vigor al día siguiente de su publicación en el Periódico Oficial del Estado de Puebla.

2.2.4 Ley de Huertos Urbanos de la Ciudad de México (2017)

Establece como derecho fundamental de las personas que habitan en la Ciudad de México contar con un huerto urbano, siempre que cumpla con las características que establecen esta ley y su reglamento (Congreso de la Ciudad de México, 2020). La ley garantiza derechos específicos que incluyen recibir capacitación por parte de la alcaldía correspondiente para instalar adecuadamente y dar mantenimiento oportuno al huerto urbano, contar con asesoría técnica de la Secretaría del Medio Ambiente para conocer qué especies son viables de tener y cuidar mediante agricultura urbana, y recibir capacitación en materia de autoempleo relacionado con la agricultura urbana (Congreso de la Ciudad de México, 2020).

La normativa establece como responsabilidad de todas las personas mantener y proteger los huertos urbanos establecidos en espacios públicos, mientras que los habitantes que posean un huerto urbano privado podrán ser beneficiarios de los Proyectos para Desarrollo de Huertos Urbanos que convoque la Secretaría del Medio Ambiente, cumpliendo con los requisitos establecidos (Congreso de la Ciudad de México, 2020). Todas las dependencias, órganos autónomos y poderes de gobierno de la Ciudad de México procurarán contar con al menos un huerto urbano en sus instalaciones, conforme a lo que establezca el reglamento de esta Ley (Congreso de la Ciudad de México, 2020).

2.2.5 Ley de Desarrollo Rural Sustentable (2001, reforma 2024)

La Ley de Desarrollo Rural Sustentable (LDRS) constituye un ordenamiento de observancia general en todo el territorio nacional, orientado a promover un desarrollo rural integral que articule la producción agropecuaria, su industrialización, comercialización y la mejora de la calidad de vida de la población rural (DOF, 2001/2024). Esta legislación reconoce como sujetos de derecho a ejidos, comunidades, asociaciones y productores rurales, fomentando la participación



social y la corresponsabilidad entre sectores público, privado y comunitario en la planeación y ejecución de políticas (DOF, 2001/2024).

Asimismo, establece como prioridades la conservación de los recursos naturales, la equidad social y de género, y la valoración de las funciones económicas, ambientales, sociales y culturales de la agricultura nacional (DOF, 2001/2024). De manera explícita, la LDRS impulsa acciones diferenciadas en regiones con mayor rezago, con el fin de diversificar la actividad productiva, incrementar la competitividad e integrar mecanismos de planeación democrática para fortalecer el bienestar de la población rural (DOF, 2001/2024).

2.2.6 Objetivos de Desarrollo Sostenible 2030 (ONU)

La estrategia para alcanzar el desarrollo sostenible requiere la convergencia de tres pilares fundamentales: progreso económico, equidad social y preservación medioambiental. Esta aproximación integral reconoce que el bienestar humano y social depende de la armonización entre crecimiento económico inclusivo, justicia social y protección de los ecosistemas. En este marco, México ha adoptado e internalizado los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por la ONU en 2015, incorporándolos progresivamente en sus políticas públicas nacionales y subnacionales.

La presente investigación doctoral contribuye directamente a la consecución de cinco ODS prioritarios:

- ODS 2 (Hambre Cero): mediante la promoción de sistemas alimentarios sostenibles y el fortalecimiento de la producción local de alimentos vegetales que mejoren la seguridad alimentaria urbana.



- ODS 3 (Salud y Bienestar): a través del fomento de la producción de alimentos inocuos y nutritivos, así como la promoción de estilos de vida saludables vinculados a la agricultura urbana.
- ODS 11 (Ciudades y Comunidades Sostenibles): por medio del desarrollo de modelos de agricultura urbana que contribuyan a la resiliencia y sostenibilidad de las ciudades intermedias como Puebla.
- ODS 12 (Producción y Consumo Responsables): mediante la implementación de sistemas productivos agroecológicos que optimicen el uso de recursos y reduzcan la dependencia de insumos externos.
- ODS 13 (Acción por el Clima): a través de la evaluación de la eficiencia energética y la reducción de la huella de carbono asociada al transporte de alimentos, contribuyendo a la mitigación del cambio climático.

Esta alineación con los ODS no solo otorga relevancia global a la investigación, sino que también posiciona los huertos urbanos familiares como herramientas estratégicas para el cumplimiento de compromisos internacionales en materia de desarrollo sostenible, particularmente en el contexto de ciudades intermedias mexicanas donde persisten desafíos significativos de seguridad alimentaria y sostenibilidad urbana (Organización de las Naciones Unidas, 2015).

2.2.7 Convenciones internacionales relevantes: Desertificación, Cambio Climático, y Estocolmo

La Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (UNCCD) constituye un instrumento jurídico internacional orientado a enfrentar la degradación de tierras en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, reconociendo que este fenómeno surge de la



interacción de factores climáticos y actividades humanas (UNCCD, 1994/1996). Su objetivo principal es combatir la desertificación y mitigar los efectos de la sequía mediante estrategias integradas a largo plazo que promuevan la rehabilitación de suelos, la conservación de los recursos y el aprovechamiento sostenible de tierras y agua, con miras a mejorar las condiciones de vida de las poblaciones rurales (UNCCD, 1994/1996). La Convención establece la obligación de los países Parte de dar prioridad a esta problemática en sus planes nacionales de desarrollo sostenible, fomentar la participación de las comunidades locales —incluyendo mujeres y jóvenes— y crear entornos institucionales y legislativos favorables para implementar programas de acción nacionales, subregionales y regionales en un marco de cooperación internacional (UNCCD, 1994/1996).

En estrecha relación con la desertificación, otro instrumento clave del derecho internacional ambiental es la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), que constituye el marco principal para enfrentar las alteraciones del sistema climático derivadas de las emisiones de gases de efecto invernadero. Su objetivo central es estabilizar las concentraciones de estos gases en la atmósfera a un nivel que evite interferencias peligrosas en el clima, asegurando que los ecosistemas puedan adaptarse de forma natural, que la producción de alimentos no se vea amenazada y que el desarrollo económico se mantenga de manera sostenible (CMNUCC, 1992). Entre sus compromisos, las Partes deben formular y actualizar inventarios nacionales de emisiones, implementar programas para mitigar y adaptarse al cambio climático, y promover el desarrollo, aplicación y transferencia de tecnologías y prácticas que controlen, reduzcan o prevengan dichas emisiones en sectores como la energía, el transporte, la agricultura, la silvicultura y la gestión de desechos (CMNUCC, 1992). Asimismo, fomenta la



cooperación internacional en investigación científica, educación y sensibilización pública sobre el cambio climático (CMNUCC, 1992).

A la par de los compromisos relacionados con suelo y clima, surge un tercer instrumento internacional orientado a la protección de la salud humana y de los ecosistemas frente a contaminantes químicos: el Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes (POPs). Este tratado, adoptado en 2001 y en vigor desde 2004, constituye un instrumento jurídico internacional cuyo propósito fundamental es eliminar o restringir la producción, el uso y la liberación de sustancias químicas altamente peligrosas que permanecen en el entorno durante largos períodos, se bioacumulan en organismos vivos y generan efectos adversos significativos (UNEP, 2001/2004). Entre sus compromisos destacan la adopción de planes nacionales de aplicación, el control de las emisiones derivadas de procesos industriales y agrícolas, y el desarrollo de alternativas ambientalmente seguras que sustituyan el uso de sustancias prohibidas o restringidas. Con ello, el Convenio sienta las bases para reducir progresivamente la exposición de las poblaciones humanas y de los ecosistemas a estos compuestos peligrosos (UNEP, 2001/2004).

2.2.8 Concepto jurídico de autonomía aplicada al agroecosistema urbano

Constituye una propiedad fundamental de los agroecosistemas, definida como el grado de integración reflejado en el movimiento de materiales, energía e información entre sus componentes, así como el control de estos flujos (Marten, 1988). Esta propiedad es multidimensional, ya que la magnitud de los flujos y la naturaleza del control pueden diferir significativamente para distintos materiales dentro del mismo agroecosistema (Marten, 1988). Los agroecosistemas sostenibles presentan autonomía alta, contrastando con la autonomía baja de los sistemas convencionales (Gliessman, 1998).



Se vincula estrechamente con otras propiedades del sistema: la productividad puede verse afectada positiva o negativamente según la organización del agroecosistema (Marten, 1988); la estabilidad se relaciona inversamente con la dependencia de insumos externos; y la sostenibilidad se fortalece mediante la reducción de la dependencia de fuerzas económicas externas. La reintroducción de diversidad biológica constituye un elemento clave para el rediseño del agroecosistema hacia mayor autonomía (Gliessman, 1998).

2.2.9 Agroecología en el marco normativo

Se define como la aplicación de conceptos y principios ecológicos para el diseño y manejo de agroecosistemas sostenibles (Gliessman, 1998). Altieri caracteriza esta disciplina como aquella que provee los principios ecológicos básicos para estudiar, diseñar y manejar agroecosistemas que son tanto productivos como conservadores de recursos naturales, y que son también culturalmente sensibles, socialmente justos y económicamente viables. Francis et al. amplían esta conceptualización, definiendo la agroecología como el estudio integrador de la ecología de todo el sistema alimentario, abarcando dimensiones ecológicas, económicas y sociales.

Gliessman establece que la agroecología actúa como un agente de cambio que busca la transformación social y ecológica que debe ocurrir para que la agricultura se desarrolle realmente sobre bases sostenibles. Esta perspectiva transdisciplinaria opera a través de la investigación y acción transdisciplinaria, participativa y orientada al cambio, vinculando la ciencia, la práctica y los movimientos enfocados en el cambio social (Gliessman, 2016). Consecuentemente, constituye una forma de rediseñar los sistemas alimentarios, desde la finca hasta la mesa, con el objetivo de lograr la sostenibilidad ecológica, económica y social.

2.3 Marco conceptual



El marco conceptual se presenta como una síntesis operativa del modelo propuesto para evaluar la sustentabilidad y eficiencia técnica de huertos urbanos familiares en Puebla. A partir de los antecedentes revisados en el marco teórico (2.1), aquí se definen las variables, notación y relaciones fundamentales que estructuran el análisis.

Notación y símbolos utilizados: Para garantizar consistencia en las fórmulas y análisis presentados, se adoptó la siguiente notación estándar:

Análisis emergético:

$U = R + N + F$ (uso total de energía del sistema, seJ)

$Y = \Sigma(Q_i \cdot UEV_i)$ (energía del producto, seJ)

R = recursos renovables locales (seJ)

N = recursos no renovables locales (seJ)

F = insumos de la economía (seJ)

$\tau = Y/E_p$ (transformicidad, seJ/J)

E_p = energía disponible del producto (J)

Modelo SFA (Frontera Estocástica):

Y_i = rendimiento por planta (kg/planta)

TR = trabajo humano (h/planta)

VA = volumen de agua (L/planta)

LO = lombricomposta (kg/planta)

GDD = grados-día de desarrollo acumulados ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{día}$)

EM = energía total por planta (seJ/planta)



Determinantes de ineficiencia:

$$u_i = \delta_0 + \delta_1 GDD_i + \delta_2 EM_i \text{ (función de ineficiencia técnica)}$$

Esta notación se mantiene consistente en todo el documento para evitar ambigüedades interpretativas.

2.3.1 Componentes del agroecosistema huerto urbano familiar

El agroecosistema urbano de Puebla se estructura en tres dimensiones fundamentales:

Componentes bióticos, conformados principalmente por hortalizas de ciclo corto como jitomate (*Solanum lycopersicum*), lechuga (*Lactuca sativa*), acelga (*Beta vulgaris* var. *cicla*) y chile (*Capsicum* sp.), que constituyen los cultivos base, complementados con especies medicinales y aromáticas de valor cultural y ancestral (Gutiérrez Flores et al., 2024; Guerrero & Silva, 2024; SMADSOT, 2022).

Componentes abióticos, caracterizados por espacios reducidos (azoteas, jardines y contenedores), sustratos urbanos que requieren regeneración mediante composta ante la baja calidad del suelo, y la disponibilidad limitada de agua municipal que obliga a sistemas de almacenamiento y manejo eficiente (García Bustamante, 2024; SMADSOT, 2022).

Componentes sociales y culturales, en los que predominan mujeres organizadas en cooperativas y grupos comunitarios que utilizan los huertos tanto para autoconsumo como para complementar ingresos, promoviendo la resiliencia económica y la reconexión urbana con la naturaleza mediante prácticas agroecológicas tradicionales (Gutiérrez Flores et al., 2024; García Bustamante, 2024; SMADSOT, 2022).

Estos elementos, junto con los servicios ecosistémicos asociados —provisión de alimentos frescos que pueden reducir el gasto alimentario familiar, regulación microclimática urbana y fortalecimiento de la identidad comunitaria—, se sintetizan aquí únicamente para contextualizar



las variables operativas del modelo (Guerrero & Silva, 2024; Gutiérrez Flores et al., 2024; SMADSOT, 2022).

2.3.1.1 Fuentes de energía y recursos

La energía solar constituye la base del crecimiento vegetal y la principal entrada de energía renovable en los huertos urbanos familiares de Puebla (SMADSOT, 2022). El agua, considerada un insumo crítico, puede alcanzar niveles de eficiencia que reducen su consumo en hasta 66% frente a sistemas convencionales (Muñoz-Nuñez et al., 2025). El suelo se enriquece mediante mezclas con lombricomposta, y las semillas garantizan la continuidad productiva, siendo significativo que un tercio de los productores conserve semillas de ciclos previos (Guerrero & Silva, 2024; Ibero, 2024).

Los recursos humanos son mayoritariamente mujeres, que dedican en promedio 45 horas semanales a labores de preparación, siembra y cosecha (Gutiérrez Flores et al., 2024). El conocimiento local se transmite en talleres, espacios comunitarios y de manera intergeneracional, y constituye un recurso estratégico para la gestión eficiente de los huertos (Guzmán et al., 2020).

Los retos principales están vinculados con la degradación del suelo urbano y la irregularidad en el suministro de agua. La urbanización ha reducido la calidad de los suelos y, en muchos casos, sustituido áreas fértiles por cemento y asfalto (García Bustamante, 2024; Guerrero & Silva, 2024). El agua, además de dura y clorada, se distribuye de manera intermitente, lo que obliga a generar estrategias de almacenamiento (Ibero, 2024).

Ante estos problemas, se aplican soluciones como el uso de composta y lombricomposta, sistemas de riego por goteo y captación de agua pluvial. Así, el conocimiento local se convierte en un recurso tan fundamental como los materiales físicos, consolidando a los huertos como espacios de innovación y aprendizaje práctico (SMADSOT, 2022; Ibero, 2024).



2.3.1.2 Prácticas de cultivo y manejo

Las prácticas de manejo en Puebla se orientan a la eficiencia de recursos, la regeneración ecológica y la resiliencia social. En comparación con sistemas convencionales, los huertos muestran mayor eficiencia en el uso del agua y menores costos de nutrientes gracias al compostaje y la valorización de residuos orgánicos (Muñoz-Nuñez et al., 2025). El manejo hídrico combina captación de agua pluvial y riego por goteo, mientras que el reciclaje de plásticos o madera reduce desechos y mejora suelos (Olvera Cuessy et al., 2024; SMADSOT, 2022).

La conservación del suelo constituye otra estrategia clave, al favorecer el secuestro de carbono, la estabilización de biomasa y la infiltración hídrica (Guerrero & Silva, 2024). El enfoque agroecológico impulsa la diversificación de cultivos sin agroquímicos y fomenta la cohesión social mediante la participación comunitaria, con impactos positivos en la recuperación de espacios abandonados y la reducción de la inseguridad (Urías & Ochoa, 2020; Rankin & Mosquera, 2019).

Los huertos urbanos pueden cubrir hasta el 18% de la dieta de una familia de 3 a 5 integrantes, generando ahorros de hasta 60% en gasto alimentario y garantizando alimentos frescos e inocuos (Gutiérrez Flores et al., 2024; Muñoz-Nuñez et al., 2022). Ambientalmente, contribuyen a reducir emisiones de gases de efecto invernadero y a conservar biodiversidad (PAN, 2024).

Las técnicas aplicadas combinan saberes tradicionales e innovaciones urbanas: siembra biointensiva, rotación de cultivos, cobertura con paja, control biológico, drenaje por zanjas y jardines verticales en espacios reducidos (Barrios, 2024; SMADSOT, 2022). Además, los módulos de “farmacias vivientes” rescatan plantas medicinales y aromáticas, reforzando tanto la salud familiar como la preservación de saberes ancestrales (SMADSOT, 2022).

Innovaciones de bajo costo incluyen compostaje con abonos animales, cenizas y lixiviados de lombriz, lombricomposta en tambos verticales y controles naturales de plagas con extractos de



hierbas. A ello se suman adaptaciones espaciales como huacales, bolsas reutilizadas y botellas PET en balcones o azoteas, transformando espacios reducidos en áreas productivas y con beneficios ambientales adicionales (De la Serna Cruz, 2024; Aguirre & Paredes, 2024; Urías & Ochoa, 2020).

2.3.1.3 Producción de alimentos vegetales

Los huertos urbanos en Puebla cumplen un papel esencial en la seguridad alimentaria al garantizar alimentos frescos, nutritivos e inocuos en entornos familiares y comunitarios. La Ley de Agricultura Urbana y los programas de SMADSOT promueven la autoproducción y reconocen la agricultura urbana como estrategia viable para el abasto local (SMADSOT, 2022). Estos sistemas alcanzan eficiencias comparables a la agricultura convencional y reducen de manera significativa los costos de alimentación familiar (Muñoz-Nuñez et al., 2025).

El impacto económico es relevante para sectores vulnerables. En Puebla, se estima que los huertos pueden cubrir entre 18% y 60% del gasto alimentario de una familia, lo que equivale a un ahorro mensual de aproximadamente \$850 MXN en un huerto de 20 m², además de proveer alimentos libres de agroquímicos (Gutiérrez Flores et al., 2024). Las hortalizas básicas constituyen la base productiva por su valor nutricional y facilidad de cultivo: jitomate, lechuga, acelga y chiles, además de especies como brócoli, col, cebolla, espinaca, betabel, zanahoria y rábanos (SMADSOT, 2022).

También se incluyen plantas medicinales y aromáticas en módulos de farmacias vivientes, que refuerzan alternativas de salud de bajo costo (SMADSOT, 2022). En menor escala, se crían aves y conejos, especialmente gallinas, como complemento de proteína animal (Colegio de Postgraduados, citado en Guerrero & Silva, 2024). La recuperación de semillas es otro elemento clave, ya que un tercio de los agricultores produce sus propias variedades, incluso conservando maíz nativo como resistencia cultural frente a transgénicos (Gutiérrez Flores et al., 2024).



La diversidad de cultivos fortalece la resiliencia del agroecosistema al mejorar la fertilidad del suelo, aumentar la infiltración de agua y favorecer la captura de carbono. Esta agrobiodiversidad contribuye a mitigar el cambio climático y reducir los efectos de islas de calor urbano, mientras refuerza la soberanía alimentaria y dinamiza la economía local (Guerrero & Silva, 2024; PAN, 2024).

2.3.1.4 Factores socioambientales y autonomía energética

La autonomía energética de los huertos depende de reducir la dependencia de insumos externos y aprovechar recursos locales. Estrategias clave incluyen la producción de semillas propias y el uso de sustratos orgánicos elaborados localmente, que permiten minimizar inversiones y sostener procesos productivos con tecnologías sencillas y conocimiento tradicional (Guerrero-Silva, 2024; Gutiérrez Flores et al., 2024).

El manejo agroecológico se apoya en fertilizantes naturales y bioplaguicidas, como biol a base de estiércol y melaza, o preparados con ortiga y cola de caballo, que sustituyen pesticidas derivados del petróleo (Muñoz-Nuñez et al., 2022). En cuanto al agua, la captación pluvial y los sistemas de riego por goteo reducen hasta en 66% el consumo respecto a la agricultura convencional (SMADSOT, 2022; Muñoz-Nuñez et al., 2025).

La innovación local, expresada en la reutilización de residuos y la adaptación creativa de espacios urbanos, refuerza la sostenibilidad energética y ambiental de los huertos (Aguirre & Paredes, 2024).

Las políticas públicas también son determinantes. En Puebla, la Ley de Agricultura Urbana y el Programa de Huertos Familiares impulsan la autoproducción y la participación comunitaria,



otorgando financiamiento, infraestructura básica y cursos de capacitación (Gobierno de Puebla, 2021; SMADSOT, 2022). Estos programas han favorecido la instalación de huertos en viviendas y la difusión de manuales prácticos que facilitan el acceso a técnicas agroecológicas (García Bustamante, 2024).

A nivel internacional, experiencias como Rosario (Argentina) demuestran que transformar estas prácticas en políticas formales garantiza seguridad en la tenencia de la tierra (Lattuca, 2019). Asimismo, la vinculación de los huertos urbanos con la Agenda 2030 los articula con objetivos globales como Hambre Cero y Producción Responsable (Urías & Ochoa, 2020).

Las condiciones climáticas de Puebla inciden directamente en la viabilidad de los cultivos. Con una altitud de 2135 m, clima subhúmedo, temperatura media anual de 16.6 °C y 720 mm de precipitación, la ciudad presenta microclimas diversos que determinan qué especies pueden desarrollarse en cada región (Muñoz-Nuñez et al., 2025). Herramientas como la metodología de Papadakis permiten clasificar zonas de cultivo y planificar la producción agrícola (Pérez-Guerrero et al., 2024).

Entre los principales desafíos se encuentran heladas, granizadas, lluvias intensas y olas de calor, además de la pérdida de áreas verdes por la expansión urbana (Gutiérrez Flores et al., 2024). Ante ello, los huertos se consolidan como alternativa ambiental al mitigar islas de calor, mejorar la infiltración pluvial y estabilizar temperaturas urbanas (Guerrero & Silva, 2024).

La diversificación de cultivos, especialmente con especies nativas de baja demanda hídrica, se reconoce como estrategia de adaptación climática en manuales estatales de resiliencia, alineando la agricultura urbana con acciones de mitigación y adaptación al cambio climático (SMADSOT, 2022).



2.3.1.5 Integral térmica y grados-día de desarrollo

Tras caracterizar recursos, manejo, producción y autonomía energética, la integral térmica se convierte en una herramienta para traducir las condiciones climáticas en decisiones de cultivo en huertos urbanos familiares de Puebla, mediante los Grados-Día de Desarrollo (GDD). La integral térmica permite calendarizar fechas y ventanas de manejo por colonia o azotea según la disponibilidad térmica local. La diversidad climática de Puebla y su altitud de 2000 m generan condiciones agroclimáticas únicas, donde cada una de las siete regiones del estado cuenta con microclimas diferenciados que determinan la viabilidad de siembra por zona (Muñoz-Nuñez et al., 2025; SMADSOT, 2022). Este enfoque posibilita que los productores urbanos predigan tiempos óptimos de siembra y cosecha para maximizar la productividad.

Los desafíos incluyen la variabilidad climática —olas de calor, granizadas, lluvias intensas, heladas— y factores urbanos como la sombra de edificios o azoteas, que modifican la temperatura efectiva y, por tanto, los cálculos de GDD (García Bustamante, 2024; Gutiérrez Flores et al., 2024).

La adaptación de los cultivos en Puebla depende de la correspondencia entre sus requerimientos térmicos y las condiciones climáticas locales. Las especies más cultivadas en huertos urbanos —jitomate (*Lycopersicon esculentum*), lechuga (*Lactuca sativa*), acelga (*Beta vulgaris* var. *cicla*) y chiles (*Capsicum* sp.)— destacan por su facilidad de producción y adaptación a microclimas urbanos (Gutiérrez Flores et al., 2024).

La selección de cultivos requiere considerar sus temperaturas base (T_{base}) específicas y su capacidad de completar ciclos productivos bajo condiciones térmicas disponibles en distintos microclimas de Puebla.

En huertos urbanos, la precisión en la aplicación de GDD depende de tres decisiones metodológicas:



Definir la temperatura base (T_{base}) específica por cultivo como insumo clave para acumular GDD coherentemente entre sitios.

Seleccionar fuentes de datos climáticos locales que reflejen microclimas urbanos (azoteas, patios sombreados o expuestos), considerando factores como sombra y viento que modifican la temperatura real percibida por el cultivo.

Establecer convenciones explícitas de cálculo (truncamientos, ventanas temporales) para asegurar comparabilidad entre temporadas, colonias y sistemas de manejo.

La fórmula básica:

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

Requiere adaptaciones en condiciones urbanas, ya que diferentes interpretaciones pueden generar variaciones significativas. La precisión se optimiza al reconocer que el desarrollo vegetal depende principalmente de la temperatura efectiva en los meristemos —los puntos de crecimiento de la planta— más que de la temperatura del aire ambiente. Este aspecto resulta especialmente relevante en microclimas urbanos, donde factores como sombra, radiación sobre superficies duras o corrientes de viento modifican las condiciones térmicas reales que experimentan los tejidos en crecimiento.

2.3.1.6 Emergía y transformicidad

La emergía y la transformicidad constituyen herramientas clave para evaluar la eficiencia y sostenibilidad de los huertos urbanos, al integrar bajo una misma unidad de medida (seJ) los aportes de recursos renovables, no renovables y servicios ecosistémicos. Estos conceptos permiten identificar la calidad de los flujos energéticos, diferenciando entre procesos de alta y baja eficiencia, y ofrecen una base sólida para interpretar la autonomía emergética de los sistemas familiares en Puebla (Odum, 1996; Brown & Ulgiati, 2004; Álvarez-Lima et al., 2020).



2.3.1.7 Inocuidad y seguridad alimentaria

En los huertos urbanos de Puebla, la inocuidad alimentaria se entiende como la producción de hortalizas libres de contaminantes biológicos y químicos a través de un manejo agroecológico que previene riesgos desde el inicio del proceso productivo. Los principales peligros están asociados al uso de plaguicidas, fertilizantes sintéticos y aguas contaminadas, que pueden comprometer la salud y degradar el ambiente (Gliessman, 1998; Gliessman et al., 2003).

En el contexto específico de los huertos urbanos familiares de Puebla, la inocuidad se operacionaliza mediante un enfoque agroecológico preventivo que integra cuatro componentes fundamentales: (1) uso exclusivo de agua potable municipal para riego, eliminando riesgos de contaminación microbiológica; (2) aplicación de lombricomposta comercial certificada como única fuente de fertilización, evitando patógenos asociados a estiércoles frescos; (3) eliminación total de pesticidas y fertilizantes sintéticos, reduciendo riesgos de residuos químicos; y (4) manejo integrado de plagas mediante extractos vegetales y control biológico (SMADSOT, 2022). Esta estrategia preventiva, respaldada por las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) para pequeña escala, asegura la producción de alimentos inocuos sin requerir verificación analítica constante de contaminantes específicos, siendo especialmente apropiada para sistemas familiares donde la trazabilidad y control directo del proceso productivo permiten garantizar la seguridad alimentaria (FAO, 2021).

La seguridad alimentaria se fortalece mediante el acceso constante a alimentos frescos y diversos, favorecido por la alta biodiversidad de los huertos familiares. Estos sistemas reducen la dependencia de insumos externos, generan autosuficiencia y promueven estabilidad económica y social en las familias urbanas (Gliessman, 1998; Francis et al., 2003).



Las prácticas agroecológicas —como el compostaje, la diversificación de cultivos, la rotación, el manejo integrado de plagas, el uso eficiente del agua y la conservación de variedades locales— garantizan alimentos inocuos y nutritivos, al mismo tiempo que fortalecen la resiliencia y sostenibilidad de los huertos en el contexto poblano (Gliessman, 1998; Gliessman et al., 2003). Este enfoque preventivo reconoce que la calidad e inocuidad de los alimentos vegetales se determina fundamentalmente durante el proceso productivo, no únicamente mediante verificación analítica posterior, alineándose con los principios agroecológicos donde la prevención en origen constituye la base de la seguridad alimentaria (Altieri & Nicholls, 2018).

2.3.1.8 Costo-beneficio como antecedente económico

El análisis costo-beneficio se reconoce como un antecedente económico relevante en la evaluación de sistemas productivos, ya que permite valorar la relación entre beneficios e inversiones bajo supuestos de eficiencia asignativa (Boardman et al., 2018; Young & Loomis, 2014). Sin embargo, en el contexto de los huertos urbanos familiares su aplicación resulta limitada, pues no incorpora dimensiones ambientales y energéticas. Por ello, en esta investigación el costo-beneficio se retoma únicamente como referencia inicial y se complementa mediante enfoques más integrales como la emergía, la integral térmica y las fronteras estocásticas de producción (Bravo-Ureta & Pinheiro, 1997; Kumbhakar et al., 2022).

2.3.2 Relaciones entre los componentes del agroecosistema y factores de sustentabilidad

2.3.2.1 Eficiencia energética y autonomía emergética

En el contexto de los huertos urbanos familiares de Puebla, la eficiencia energética se entiende como la optimización de la relación entre alimentos producidos e insumos empleados en el proceso. Esta eficiencia se analiza a partir de indicadores emergéticos, donde la transformicidad



expresa la cantidad de energía necesaria por unidad de producto y funciona como un proxy inverso de la eficiencia técnica (Álvarez-Lima et al., 2020; Campbell & Lu, 2024).

El uso de la energía como unidad común (seJ) permite integrar en un mismo marco analítico los aportes de recursos renovables y no renovables, así como el trabajo humano y los servicios ecosistémicos que sostienen la producción (Álvarez-Lima et al., 2020). Entre los indicadores aplicados en este tipo de sistemas destacan la Razón de Rendimiento Emergético (EYR), que refleja la capacidad del huerto para aprovechar recursos locales frente a los externos, y la Razón de Inversión Emergética (EIR), que señala el grado de dependencia de insumos comprados (Avalos-Rangel et al., 2021).

La eficiencia en el uso de recursos naturales se vincula estrechamente con la adopción de prácticas agroecológicas adaptadas al entorno urbano poblano. Estrategias como el compostaje, la incorporación de estiércol y abonos verdes, así como la reutilización de residuos orgánicos, favorecen la restitución de nutrientes de manera renovable (Agostinho et al., 2008). Del mismo modo, el manejo hídrico eficiente —que incluye la captación de agua pluvial, la infiltración mediante vegetación nativa y la recirculación de agua dentro del sistema— constituye un eje fundamental para reducir la presión sobre fuentes externas (Cavalett et al., 2006).

En este sentido, la reducción de la dependencia de insumos externos se alcanza al priorizar la diversidad de cultivos, la rotación, el reciclaje de materiales y el uso de recursos renovables locales. Tales prácticas fortalecen la autosuficiencia de los huertos familiares y elevan su eficiencia energética al disminuir la entrada de recursos no renovables (Avalos-Rangel et al., 2021; Cavalett et al., 2006).



2.3.2.2 Interacción entre clima, energía y productividad

La sustentabilidad de los huertos urbanos familiares en Puebla puede evaluarse de manera más robusta cuando se integran distintos enfoques analíticos. El análisis emergético ofrece un marco para cuantificar la autonomía del sistema, diferenciando entre recursos renovables y no renovables y evidenciando la capacidad de los huertos para reducir su dependencia de insumos externos. Esta perspectiva permite identificar en qué medida los flujos internos —suelo, agua, nutrientes y trabajo familiar— sostienen la producción frente a las presiones económicas y ambientales (Brown & Ulgiati, 2004; Alvarez-Lima et al., 2020).

La integral térmica complementa este análisis al establecer la disponibilidad climática para el desarrollo de los cultivos. Al estimar la acumulación de grados-día necesarios para completar los ciclos productivos, se determinan los límites biofísicos que condicionan la productividad agrícola en el entorno urbano de Puebla. Con ello, se incorpora una dimensión térmica que vincula directamente las condiciones locales de temperatura con el rendimiento potencial de los cultivos (Cao et al., 2015; Avalos-Rangel et al., 2021).

Las fronteras estocásticas de producción (SFA) funcionan como el puente metodológico que integra las variables energéticas y térmicas en un modelo de eficiencia técnica. Al relacionar los insumos energéticos y la disponibilidad térmica con los productos obtenidos, la SFA permite estimar la eficiencia relativa de los huertos y comparar su desempeño frente a una frontera de referencia. Este enfoque econométrico añade la posibilidad de cuantificar brechas de eficiencia y proponer mejoras en el uso de recursos bajo condiciones urbanas específicas (Coelli, Rao, O'Donnell, & Battese, 2005).

En conjunto, la emergía, la integral térmica y las fronteras estocásticas configuran un marco analítico integrado. Mientras la emergía aporta una visión sistémica de la autonomía y resiliencia,



la integral térmica define los límites biofísicos de la producción, y la frontera estocástica traduce ambos en indicadores comparables de eficiencia y sustentabilidad. De esta manera, es posible construir una evaluación holística de los huertos urbanos en Puebla, considerando simultáneamente sus dimensiones energéticas, climáticas y productivas (Odum, 1996; Brown et al., 2016).

2.3.2.3 Impacto socioeconómico y sustentabilidad

El análisis emergético aporta un marco integral para evaluar los huertos urbanos familiares de Puebla, al cuantificar de manera conjunta los aportes ambientales y económicos mediante una unidad común: el emjoule solar (seJ). Dentro de este enfoque, los indicadores emergéticos permiten interpretar la eficiencia, la renovabilidad y el grado de sostenibilidad de los sistemas, ofreciendo un lenguaje común para comparar procesos productivos que dependen de recursos de distinta calidad (Álvarez-Lima et al., 2020).

La transformicidad (Tr) revela la calidad de la energía y la posición jerárquica de los productos dentro de la red de transformaciones energéticas. Un menor valor de transformicidad indica un proceso más eficiente y, por tanto, mayor capacidad de aprovechar recursos locales en la producción (Campbell, 2024). Por su parte, la renovabilidad (%R) expresa la proporción de recursos renovables en el sistema, aspecto crucial para asegurar la sostenibilidad en el largo plazo (Avalos-Rangel et al., 2021).

Otros indicadores se orientan a medir la relación entre eficiencia productiva y presión ambiental. La Razón de Rendimiento Emergético (EYR) indica la capacidad del huerto para obtener beneficios netos a partir de recursos locales en comparación con los insumos externos. La Razón de Inversión Emergética (EIR) evalúa la eficiencia en el uso de los recursos invertidos, mientras que la Razón de Carga Ambiental (ELR) mide la presión ecológica derivada de la



actividad productiva. Finalmente, el Índice de Sostenibilidad Emergética (ESI), calculado como la razón entre EYR y ELR, integra estas dimensiones para ofrecer una medida sintética del nivel de sostenibilidad del sistema (Avalos-Rangel et al., 2021).

En el caso de Puebla, estos indicadores adquieren relevancia al operacionalizar la relación entre disponibilidad de recursos renovables, dependencia de insumos externos y presión ambiental propia del contexto urbano. De este modo, la evaluación emergética permite identificar fortalezas y limitaciones de los huertos familiares como estrategias de autosuficiencia y resiliencia urbana.

Asimismo, la Emergía por unidad monetaria (EMR) constituye un puente entre los valores biofísicos y económicos, al traducir emergía a valores monetarios y viceversa, posibilitando la integración del análisis ambiental con la evaluación costo-beneficio (Álvarez-Lima et al., 2020). Con ello, se logra una contabilidad integral que visibiliza el aporte de servicios ecosistémicos que usualmente quedan fuera de la economía convencional.

2.3.2.4 Reciclaje de nutrientes y residuos

En los huertos urbanos familiares de Puebla, el ciclaje de nutrientes se concibe como la transformación de residuos orgánicos en insumos productivos, asegurando la fertilidad del suelo y la autonomía del sistema. A través de prácticas como el compostaje y la lombricomposta, y los desechos domésticos se integran nuevamente al ciclo productivo, reduciendo la dependencia de insumos químicos y promoviendo un manejo sostenible de recursos (SMADSOT, 2022; Agostinho et al., 2008).

Este proceso se fundamenta en los ciclos biogeoquímicos, los cuales actúan como servicios de soporte que mantienen la regeneración del suelo, el ciclo hidrológico y la producción primaria, contribuyendo a la biocapacidad de los ecosistemas urbanos (Guerrero & Silva, 2024). En este sentido, los huertos no solo reciclan nutrientes, sino que también participan en la fijación de



carbono, la producción de oxígeno y la mejora de la calidad del aire, fortaleciendo la resiliencia ambiental de la ciudad (Muñoz-Nuñez et al., 2025).

La integración de animales menores —como gallinas, conejos o borregos— refuerza el cierre de ciclos internos al proveer estiércol que, transformado mediante lombricomposta, retorna nutrientes al suelo de manera endógena. De esta forma, se consolida un esquema de autosuficiencia que combina la fertilidad natural del suelo con insumos renovables locales (Odum, 2007).

Prácticas como la rotación y asociación de cultivos, el uso de bioinsumos para control biológico, la captación de agua pluvial y la diversificación productiva (hortalizas, plantas medicinales y condimentos) refuerzan el reciclaje interno y disminuyen la vulnerabilidad a factores externos. Asimismo, la reutilización creativa de materiales de desecho en estructuras productivas vincula la dimensión social y ambiental, consolidando la autonomía emergética de los sistemas familiares urbanos.

2.3.3 Modelo conceptual integrado SFA–Emergía–Integral térmica

El modelo conceptual de esta investigación articula tres enfoques metodológicos complementarios con el propósito de evaluar integralmente la autonomía y sustentabilidad de huertos urbanos familiares en Puebla:

Contabilidad emergética (EM): cuantifica los flujos de recursos renovables, no renovables y económicos en una unidad común (seJ), permitiendo estimar indicadores de eficiencia energética y carga ambiental (Odum, 1996; Brown & Ulgiati, 2004).

Integral térmica (GDD): mide la acumulación de grados-día de desarrollo como expresión de la disponibilidad biofísica de energía térmica para el crecimiento vegetal (McMaster & Wilhelm, 1997; Bonhomme, 2000).



Fronteras estocásticas de producción (SFA): permiten estimar la eficiencia técnica a partir de una función de producción que incorpora tanto insumos convencionales como determinantes externos de la ineficiencia (Battese & Coelli, 1995; Kumbhakar & Lovell, 2000).

Esta integración se formaliza matemáticamente mediante dos niveles de análisis que se articulan sistemáticamente:

Función de producción:

$$Y_i = f(X_{conv,i}; \beta) \exp(v_i - u_i)$$

donde Y_i es la producción observada (kg/planta), $X_{conv,i}$ incluye los insumos convencionales (trabajo –TR–, agua –VA– y lombricomposta –LO–), β son los parámetros para estimar, $v_i \sim N(\mathbf{0}, \sigma_v^2)$ es el término aleatorio y $u_i \geq \mathbf{0}$ representa la ineficiencia técnica.

Determinantes de la ineficiencia:

$$\mu_i = \delta_0 + \delta_1 GDD_i + \delta_2 EM_i$$

donde GDD_i representa la integral térmica acumulada y EM_i la energía total por planta.

De este modo, los insumos convencionales explican el rendimiento observado, mientras que las variables biofísicas (GDD y EM) capturan restricciones ambientales externas que condicionan la eficiencia técnica. Esta aproximación permite evaluar simultáneamente la eficiencia energética, la disponibilidad climática y el desempeño productivo en un marco integrado y multidimensional (Battese & Coelli, 1995; Greene, 2005; Avalos-Rangel et al., 2021).

La contribución conceptual de este modelo radica en que la sustentabilidad de los huertos urbanos familiares no se aborda con un criterio único, sino mediante la convergencia de indicadores energéticos, climáticos y técnicos. Esta visión integral permite evaluar:

- la autonomía energética (grado de dependencia de recursos externos),
- la adaptación climática (resiliencia frente a la variabilidad térmica), y



- la eficiencia técnica productiva (uso óptimo de insumos convencionales).

En conjunto, el modelo proporciona una base analítica robusta para comprender y optimizar la contribución de los huertos urbanos familiares a la seguridad alimentaria y la resiliencia urbana en ciudades intermedias como Puebla (Villavicencio-Valdez et al., 2023; Muñoz-Núñez et al., 2025).

2.3.4 Teoría del trabajo de investigación

La teoría del trabajo de investigación se fundamenta en la integración metodológica de tres componentes analíticos complementarios para evaluar integralmente la sustentabilidad de huertos urbanos familiares: (i) la contabilidad emergética, que cuantifica el uso y transformación de recursos energéticos bajo una unidad común (seJ) (Odum, 1996; Álvarez-Lima et al., 2020); (ii) la integral térmica, que refleja la disponibilidad biofísica de energía térmica necesaria para el desarrollo vegetal mediante grados-día de desarrollo (GDD) (McMaster & Wilhelm, 1997; Bonhomme, 2000); y (iii) el análisis de frontera estocástica de producción, que estima la eficiencia técnica del sistema productivo (Battese & Coelli, 1995; Kumbhakar & Lovell, 2000).

En este marco teórico integrado, los insumos productivos convencionales (TR, VA, LO) determinan el rendimiento observado (Y), mientras que las variables biofísicas GDD y EM funcionan como determinantes ambientales que explican diferencias en la ineficiencia técnica (u_i), siguiendo el enfoque de Battese y Coelli (1995) para la incorporación de variables exógenas en modelos de ineficiencia. Esta aproximación permite superar las limitaciones de análisis unidimensionales al capturar simultáneamente la eficiencia energética (emergía), las restricciones climáticas (integral térmica) y la eficiencia productiva (frontera estocástica) en un modelo coherente (Brown & Ulgiati, 2004; Avalos-Rangel et al., 2021).



La contribución teórica radica en demostrar que la sustentabilidad de los huertos urbanos familiares no puede evaluarse adecuadamente mediante un solo criterio, sino que requiere la convergencia de indicadores energéticos, térmicos y de eficiencia técnica (Gliessman, 1998; Langemeyer et al., 2021). Este modelo permite evaluar la autonomía emergética, la adaptación climática y la optimización productiva como dimensiones complementarias de un sistema agroecológico urbano integral, contribuyendo al fortalecimiento de la seguridad alimentaria en ciudades intermedias como Puebla (Villavicencio-Valdez et al., 2023; Muñoz-Núñez et al., 2025).

2.3.5 Paradigma y enfoque epistemológico

El análisis de los huertos urbanos familiares en Puebla se sustenta en una visión epistemológica que combina los enfoques empirista-realista y racionalista-realista propuestos por Padrón (2007). El primero se caracteriza por la medición y experimentación de variables observables, como la emergía, la integral térmica y los grados-día; mientras que el segundo se asocia con abstracciones y modelos lógico-matemáticos, indispensables para aplicar metodologías como las fronteras estocásticas de producción. Esta combinación permite articular observación empírica y modelación conceptual en la evaluación de sistemas complejos.

El paradigma científico adoptado es sistémico y agroecológico, considerando la agroecología como una disciplina transdisciplinar orientada a la integración de procesos ecológicos, sociales y económicos para la sostenibilidad (Terán-Samaniego et al., 2025). Este enfoque reconoce la naturaleza multiescalar de la agricultura urbana y la necesidad de modelos que combinen procesos empíricamente medibles y construcciones teóricas.

La articulación de métodos cuantitativos y cualitativos responde a la crítica de Padrón (2007) sobre la dicotomía simplificadora entre ambos enfoques, al señalar que la realidad no es exclusivamente objetiva o subjetiva. Hernández-Sampieri (2018) aporta la perspectiva



metodológica para integrar ambos en un diseño mixto, donde los datos numéricos (energía, eficiencia técnica, grados-día) se complementan con las percepciones sociales y las prácticas agroecológicas locales. La agroecología, al ser participativa y orientada a la acción, se alinea con una visión pragmática y de pluralismo metodológico, en la que se elige el enfoque más pertinente según el problema a resolver.

2.3.6 Tipo de investigación

En el ámbito metodológico, el tipo de investigación constituye una categoría analítica que orienta la selección de procedimientos y la forma en que se abordan los fenómenos estudiados. Diversos autores (Hernández-Sampieri, 2018; Padrón, 2007; Creswell & Plano Clark, 2018) distinguen entre estudios aplicados y básicos, siendo los primeros aquellos que buscan generar conocimiento con un propósito práctico y contextualizado. La investigación aplicada en ciencias ambientales y agroecológicas se orienta a proveer soluciones a problemáticas concretas de sostenibilidad y gestión de recursos, más allá de la mera construcción teórica.

Asimismo, la literatura metodológica diferencia entre diseños observacionales y experimentales. Los estudios observacionales no manipulan variables independientes, sino que registran sistemáticamente procesos y comportamientos en condiciones reales, lo que los convierte en un recurso valioso para la evaluación de sistemas socioecológicos en contextos urbanos (Hernández-Sampieri et al., 2018).

Por otra parte, los diseños longitudinales se caracterizan por el seguimiento temporal de los fenómenos, permitiendo identificar tendencias y variaciones en el tiempo, a diferencia de los diseños transversales, que ofrecen una visión de corte único. En investigaciones agrícolas, el seguimiento longitudinal resulta indispensable para captar el desempeño de los cultivos a lo largo de su ciclo biológico.



Dentro de la tipología de alcance, los estudios descriptivos buscan caracterizar integralmente un fenómeno, mientras que los correlacionales se orientan a analizar la relación estadística entre dos o más variables. La combinación de ambos niveles permite no solo detallar las propiedades de un sistema, sino también explorar asociaciones entre factores biofísicos, energéticos y sociales que influyen en su funcionamiento (Padrón, 2007; Hernández-Sampieri, 2018).

Finalmente, la adopción de un enfoque mixto se justifica teóricamente por la necesidad de articular datos cuantitativos —como indicadores energéticos, climáticos y de eficiencia técnica— con información cualitativa sobre prácticas locales y percepciones sociales. Esta integración metodológica responde a la complejidad intrínseca de los sistemas agrícolas urbanos y fortalece la validez de las conclusiones (Creswell & Plano Clark, 2018).

2.3.7 Estado del arte de la investigación

Los antecedentes sobre emergía destacan la obra de Odum (1996), que sienta las bases para cuantificar la memoria emergética de los sistemas. Estudios aplicados en agroecosistemas latinoamericanos, como Agostinho et al. (2008) y Avalos-Rangel et al. (2021), muestran que los sistemas familiares alcanzan mayor autosuficiencia y renovabilidad al depender en mayor medida de recursos locales.

En cuanto a la integral térmica, McMaster y Wilhelm (1997) desarrollaron los métodos básicos de cálculo, mientras que aplicaciones recientes en Puebla demuestran su utilidad para planificar cultivos en huertos urbanos bajo condiciones específicas (Muñoz-Nuñez et al., 2025).

Respecto a las fronteras estocásticas de producción, la propuesta pionera de Aigner et al. (1977) y sus posteriores desarrollos han permitido estimar eficiencia técnica en diversos contextos agrícolas, incorporando factores ambientales y de manejo.



Los vacíos de conocimiento radican en la falta de estudios integrales que combinen energía, integral térmica y SFA en la evaluación de huertos urbanos, particularmente en ciudades intermedias mexicanas. Terán-Samaniego et al. (2025) señalan que pocos trabajos han abordado cómo las diferencias de escala y alcance influyen en la eficiencia de los sistemas agroalimentarios, lo cual es clave en la agricultura urbana.

La justificación de este estudio se encuentra en su capacidad de llenar dichos vacíos mediante una aproximación metodológica innovadora que integra lo energético, lo térmico y lo econométrico. Así, se posiciona como un aporte original tanto al conocimiento científico como al diseño de políticas y programas orientados a la sustentabilidad alimentaria en Puebla y otras ciudades intermedias.



CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3.1 Localización y zona de estudio

El estudio se desarrolló en la ciudad de Puebla, México, capital del estado homónimo, situada en la región centro del país (19°02' N, 98°11' W) a 2,135 m s.n.m. (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2020). De acuerdo con la clasificación climática de Köppen modificada por García, la zona presenta un clima templado subhúmedo con lluvias en verano (Cwb), con temperatura media anual de 16.6 °C y precipitación promedio de 720 mm (García, 2004; Servicio Meteorológico Nacional [SMN], 2022). Estas condiciones son representativas de ciudades intermedias mexicanas donde se busca evaluar la viabilidad de sistemas agroecológicos urbanos vease Figura 6.

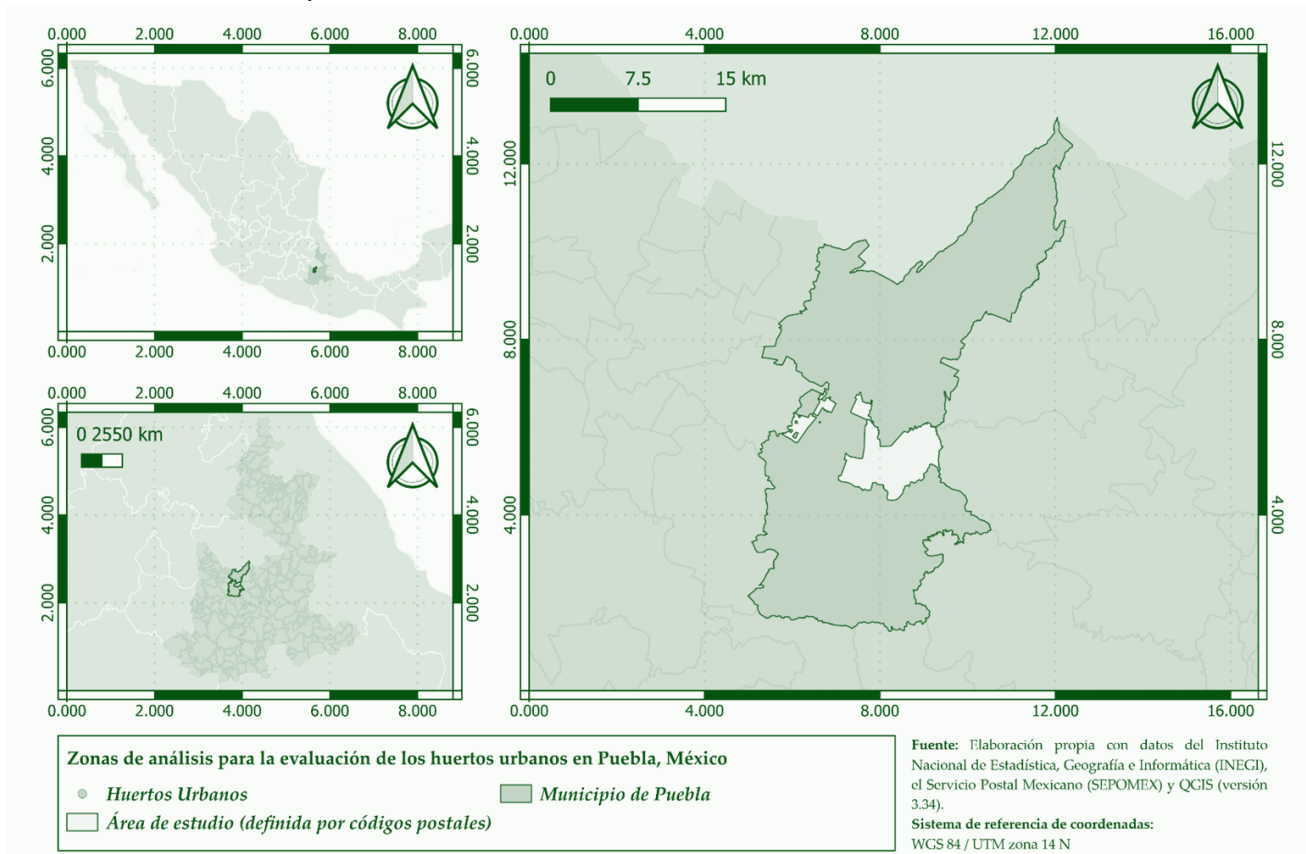
La ciudad de Puebla concentra una población de 1.69 millones de habitantes distribuidos en 534.32 km², con una densidad poblacional de 3,164 hab/km², lo que la convierte en la cuarta área metropolitana más importante del país (Consejo Nacional de Población [CONAPO], 2023). Este escenario urbano constituye un laboratorio estratégico para el análisis de la agricultura urbana en contextos de alta densidad, donde la presión sobre suelo y recursos plantea retos para la seguridad alimentaria (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2019).

La expansión acelerada de la mancha urbana en Puebla ha reducido de manera significativa las áreas agrícolas periurbanas, incrementando la dependencia de cadenas de suministro externas y, con ello, la vulnerabilidad del sistema alimentario local frente a perturbaciones económicas y climáticas (Estrada et al., 2022; Naciones Unidas, 2017). En este contexto, los huertos urbanos familiares representan una estrategia clave para fortalecer la resiliencia alimentaria y la sostenibilidad ambiental (Altieri & Nicholls, 2018).



Figura 6.

Área de estudio y establecimiento de los huertos urbanos



La elección de Puebla como área de estudio se sustentó en cuatro criterios metodológicos:

- Modelo de ciudad intermedia latinoamericana, con características socioambientales extrapolables a otros contextos regionales.
- Marco institucional favorable, respaldado por la Ley de Agricultura Urbana del Estado de Puebla (2013) y los Lineamientos del Programa de Huertos urbanos familiares (Gobierno del Estado de Puebla, 2021).
- Alto potencial social, reflejado en que 73% de las familias poblanas manifiestan disposición a cultivar alimentos agroecológicos en espacios domésticos (Muñoz-Núñez et al., 2022).



- Condiciones climáticas y altitudinales específicas, que permiten evaluar la respuesta de especies hortícolas bajo ambientes urbanos y limitaciones espaciales que requieren innovaciones tecnológicas y de manejo (Moreno-Peñaranda & Gasparatos, 2019).

Los tres sitios experimentales se ubicaron en la zona centro-sur de la ciudad, seleccionados con base en criterios de accesibilidad logística, disponibilidad de superficie mínima de 6 m², representatividad urbana y acceso a servicios básicos. Estas áreas, caracterizadas por alta presión de uso de suelo, constituyen escenarios reales para probar la viabilidad de huertos urbanos en espacios reducidos.

Finalmente, la implementación experimental en predios domésticos, bajo condiciones controladas de sustrato, riego manual y prácticas agroecológicas, permitió representar simultáneamente factores ambientales del microclima urbano y elementos sociales vinculados al interés comunitario en alimentos frescos e inocuos. De esta forma, la zona de estudio se concibe como un entorno socioambiental integral donde los huertos urbanos familiares funcionan como estrategia para mejorar la seguridad alimentaria, optimizar recursos locales y fortalecer la resiliencia frente a los procesos de urbanización acelerada.

3.2 Diseño de la investigación

3.2.1 Diseño metodológico

El estudio se desarrolló bajo un diseño mixto, de carácter cuantitativo y cualitativo, orientado a evaluar la autonomía energética, la eficiencia técnica y la sustentabilidad de huertos urbanos familiares en la ciudad de Puebla. La metodología combinó la medición de variables biofísicas y productivas con información socioeconómica recolectada en campo, permitiendo una aproximación integral al fenómeno en condiciones reales de manejo urbano.



3.2.2 Tipo de investigación

La investigación se clasifica como aplicada, observacional, longitudinal y descriptiva–correlacional, desarrollada bajo un enfoque mixto. Se considera aplicada por su orientación hacia la resolución de un problema concreto —la sostenibilidad alimentaria urbana— mediante la evaluación de huertos familiares en la ciudad de Puebla. Se define como observacional, dado que no se manipularon variables independientes ni se aplicaron tratamientos diferenciados, sino que se registraron de manera sistemática los procesos productivos y ambientales en condiciones agroecológicas reales. Asimismo, es longitudinal, en tanto que el levantamiento de información comprendió el seguimiento continuo de variables productivas, climáticas y energéticas durante el ciclo completo de cultivo.

El carácter descriptivo–correlacional se justifica porque, además de la caracterización integral de los sistemas hortícolas, se analizaron las asociaciones entre variables emergéticas (EYR, ELR, ESI), térmicas (grados-día), socioeconómicas y de rendimiento agronómico, lo que permitió identificar patrones de relación sin establecer causalidad experimental (Hernández-Sampieri et al., 2018). Finalmente, el enfoque mixto se fundamenta en la integración de información cuantitativa —cálculos energéticos, integral térmica y modelado estocástico de frontera (SFA)— con evidencia cualitativa vinculada a prácticas de manejo y percepciones sociales, lo cual incrementó la robustez interpretativa y la validez de los hallazgos (Creswell & Plano Clark, 2018; Padrón, 2007).

3.2.3 Enfoque mixto

El enfoque mixto permitió integrar resultados de naturaleza cuantitativa —derivados de cálculos energéticos, mediciones climáticas y modelado econométrico— con observaciones cualitativas sobre el manejo y desempeño de los huertos. Esta triangulación fortaleció la



interpretación de los resultados y redujo sesgos asociados a la dependencia de un solo tipo de evidencia (Creswell & Plano Clark, 2018).

3.2.4 Diseño de caso múltiple y estructura jerárquica

Se aplicó un diseño de caso múltiple (Yin, 2018), con estructura jerárquica de tres niveles:

- Nivel 1: 144 plantas individuales.
- Nivel 2: cuatro especies hortícolas (*Solanum lycopersicum*, *Lactuca sativa*, *Beta vulgaris* var. *cicla* y *Spinacia oleracea*).
- Nivel 3: tres sitios urbanos independientes dentro de la ciudad de Puebla.

Este diseño permitió analizar efectos fijos (especies) y efectos aleatorios (sitios) mediante modelos lineales mixtos (Pinheiro & Bates, 2000). La replicación en tres sitios controló la heterogeneidad espacial, mientras que la inclusión de cuatro especies representativas facilitó la comparación de respuestas diferenciales bajo condiciones urbanas reales. El tamaño muestral (12 plantas por especie en cada sitio) otorgó suficiente potencia estadística para detectar diferencias $\geq 15\%$ en rendimiento con un coeficiente de variación esperado del 25%.

La unidad de análisis estadístico primaria fue la planta individual ($n = 144$). La superficie productiva por huerto fue de 7.61 m², con 48 plantas por sitio (0.159 m²/planta). En conjunto, los tres huertos representaron 22.83 m² de superficie efectiva. Este arreglo es congruente con los parámetros de espaciamiento documentados en diferentes artículos (jitomate: 0.16 m²/planta; hortalizas de hoja: 0.12 m²/planta), por lo que se evitó extrapolar a escalas comerciales (hectárea) no representativas de huertos urbanos familiares.



3.3 Implementación del experimento

3.3.1 Establecimiento de huertos urbanos familiares

Se implementaron tres unidades experimentales independientes en la zona centro-sur de Puebla, México, durante el mes de enero para comenzar a producir entre febrero y mayo de 2022. Cada unidad replicó las condiciones reales de un huerto urbano familiar, considerando limitaciones espaciales, recursos disponibles y prácticas agroecológicas comunes.

3.3.2 Diseño y dimensiones de las parcelas experimentales

Cada huerto ocupó 7.61 m² de superficie productiva (3.73 m × 2.04 m), con 48 plantas (12 por especie) en bolsas de 20 L distribuidas en cuatro bloques (uno por especie) con separación de 0.50 m entre bloques. De este modo, la superficie efectiva por planta fue de 0.159 m²/planta, valor congruente con los espaciamientos utilizados en la tesis de maestría (0.12–0.16 m²/planta). La superficie total de los tres huertos fue de 22.83 m². Se germinó en charolas de unicel de 200 cavidades, lo que permitió tener más ejemplares y seleccionar para el trasplante ver figura 7.

Figura 7.

Almácigos para la siembra de hortalizas (fotografía de elaboración propia, 2022).



3.3.3 Contenedores y formulación del sustrato

Se emplearon bolsas de polietileno negro de 20 L (35 cm × 30 cm), perforadas en la base (4 orificios de 7 mm) y con una capa de 2 cm de tezontle como drenaje. El sustrato se formuló a partir de suelo urbano franco-arcilloso ($\approx 70\%$), complementado con peatmoss (10% v/v), perlita (5% v/v) y vermiculita (5% v/v) para mejorar la aireación, la retención de humedad y la estabilidad estructural. Además, se aplicaron 250 g de lombricomposta por planta ($\approx 12.5\%$ del volumen del contenedor) como enmienda orgánica. Finalmente, se colocó una capa superficial de 1.5 cm de tezontle como cobertura, con el objetivo de reducir evaporación y prevenir compactación superficial del sustrato.

3.3.4 Selección de especies hortícolas

Se cultivaron cuatro especies hortícolas representativas por su consumo frecuente en el contexto urbano de Puebla y su relevancia en estudios agroecológicos previos: jitomate (*Solanum lycopersicum* var. Rio Grande), lechuga (*Lactuca sativa* var. Great Lakes), acelga (*Beta vulgaris* var. cicla Fordhook Giant) y espinaca (*Spinacia oleracea* var. Space).

El diseño experimental contempló 12 plantas por especie en cada sitio, sumando un total de 144 individuos distribuidos homogéneamente en los tres huertos urbanos familiares. Esta selección permitió abarcar tanto especies de hoja como de fruto, con distintos requerimientos fisiológicos y fenológicos, lo que facilitó la evaluación comparativa de eficiencia térmica, rendimiento agronómico y manejo agroecológico preventivo de inocuidad.

3.3.5 Manejo agroecológico

Una vez definidas las especies hortícolas, se estableció un protocolo de manejo homogéneo en los tres sitios de estudio, aplicándose bajo un esquema de agricultura urbana de pequeña escala con principios agroecológicos:



- Riego: manual con regadera de flujo fino; diario en hortalizas de hoja y en jitomate, evitando encharcamientos.
- Control fitosanitario: basado en rotación de cultivos, asociaciones benéficas y aplicaciones de extractos vegetales (ajo, cebolla, chile), soluciones jabonosas biodegradables y microorganismos benéficos, en sustitución de pesticidas sintéticos.
- Fertilización: aplicación única inicial de lombricomposta comercial, sin suplementaciones posteriores.

Este manejo agroecológico garantizó condiciones estandarizadas y libres de agroquímicos, favoreciendo la resiliencia del sistema y la producción de alimentos con bajo riesgo de contaminación.

3.3.5.1 Protocolo de inocuidad alimentaria agroecológica

La inocuidad alimentaria se abordó en esta investigación desde un enfoque preventivo y agroecológico, sin recurrir a análisis fisicoquímicos de laboratorio (p. ej., coliformes, metales pesados), sino mediante la implementación de prácticas de manejo seguras desde el origen del proceso productivo.

El protocolo aplicado incluyó cuatro ejes principales:

- Calidad del agua: se utilizó de manera exclusiva agua potable municipal, con parámetros de cloro residual establecidos en la NOM-127-SSA1-2017 (0.2–1.5 mg/L), eliminando riesgos de contaminación microbiológica por coliformes o parásitos.



- Fertilización orgánica certificada: se aplicó únicamente lombricomposta comercial con certificación de calidad (C/N 10–15:1), evitando estiércoles frescos o compostajes domésticos que pudieran contener patógenos.
- Eliminación de agroquímicos: el manejo se realizó al 100% con prácticas orgánicas, sin empleo de pesticidas, herbicidas o fertilizantes sintéticos, reduciendo el riesgo de residuos químicos en el producto final.
- Control fitosanitario natural: se emplearon extractos vegetales (ajo, cebolla, chile) y soluciones jabonosas biodegradables en el manejo integrado de plagas, en concordancia con protocolos de agricultura orgánica (Gliessman, 2016; SMADSOT, 2022).

Este enfoque se fundamenta en las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) y las Buenas Prácticas de Manejo (BPM) adaptadas a pequeña escala, asegurando la inocuidad a través del control directo del proceso productivo en lugar de depender de verificaciones analíticas posteriores (FAO, 2021; Romanova et al., 2021).

La estrategia adoptada se alinea con los principios de la agroecología, donde la prevención en origen constituye la base de la seguridad alimentaria (Altieri & Nicholls, 2018). En consecuencia, la inocuidad en este estudio se entiende como una condición garantizada por el uso de agua segura y fertilización orgánica, así como por la exclusión absoluta de agroquímicos de síntesis, coherente con los lineamientos de sistemas agroecológicos urbanos (FAO, 2021; SMADSOT, 2022).



3.3.6 Monitoreo climático e integral térmica

El microclima se registró mediante un datalogger GSP-6 (Elitech Technology, Inc.) en un sitio experimental representativo. El dispositivo se configuró con intervalos de 15 minutos (96 registros diarios) y precisión de ± 0.5 °C (temperatura) y $\pm 5.0\%$ (humedad relativa).

3.3.6.1 Calibración cruzada y validación

Se correlacionaron los datos in situ con registros horarios de la plataforma Open-Meteo (estación WMO 76458, a 2.3 km). Se aplicaron regresiones lineales para ajustar temperatura máxima y mínima diaria, generando series sintéticas calibradas para los sitios sin instrumentación.

3.3.6.2 Detección y corrección de valores atípicos

Se aplicó la prueba de Grubbs ($\alpha = 0.05$). Los valores atípicos confirmados como errores instrumentales fueron sustituidos mediante interpolación lineal, mientras que los extremos genuinos se conservaron.

3.3.6.3 Cálculo de grados-día de desarrollo (GDD)

La integral térmica se calculó con la fórmula:

$$GDD = \sum_{i=1}^n \left(\frac{T_{max,i} + T_{min,i}}{2} - T_{base} \right)$$

donde $T_{max,i}$ y $T_{min,i}$ corresponden a temperaturas máximas y mínimas diarias y T_{base} a la temperatura mínima fisiológica de cada especie.

3.3.6.4 Temperaturas base

Jitomate: 10 °C | Lechuga: 5 °C | Acelga: 5 °C | Espinaca: 5 °C



3.3.6.5 Ajustes metodológicos

Los valores negativos se truncaron a cero. Las temperaturas superiores a 35 °C se limitaron a este umbral para evitar sobreestimación por estrés térmico.

3.3.6.6 Variables derivadas

GDD acumulados por fase fenológica.

Integral térmica total del ciclo.

Eficiencia térmica (kg rendimiento/GDD acumulados).

3.3.7 Inventario de insumos y flujos emergéticos

Se cuantificaron materiales, energía y trabajo humano según la metodología de Odum (1996). Los insumos se clasificaron en tres categorías: recursos renovables locales (R), no renovables locales (N) e insumos de la economía (F).

3.3.8 Registro de variables productivas

Se aplicó un protocolo estandarizado para medición de rendimiento (***Y_i***) y calidad.

Pesaje: biomasa fresca y fracción comercializable con balanza analítica (± 0.1 g).

Frecuencia: según fenología (jitomate semanal, lechuga y espinaca cosecha única, acelga cada 15 días).

Calidad: firmeza, color, uniformidad, materia seca y estado fitosanitario.

Control de calidad: calibración de equipos, estandarización de procedimientos y verificación cruzada del 10% de muestras.

Análisis estadístico: modelos de efectos mixtos y estimación de eficiencia técnica mediante frontera estocástica de producción (SFA).



3.3.9 Encuesta socioambiental sobre saberes familiares

Se aplicó una encuesta estructurada (n=240) con el fin de caracterizar los saberes previos sobre producción hortícola. El instrumento incluyó preguntas sobre: (1) experiencia previa en cultivo de vegetales; (2) barreras percibidas para no producir; y (3) factores ambientales identificados como necesarios para el cultivo. De esta forma se operacionalizó la variable saberes familiares en tres dimensiones: práctica, barreras y conocimiento básico.

La elección de la encuesta como instrumento respondió a que los saberes familiares constituyen un factor socioambiental que no puede ser medido mediante variables experimentales o biofísicas, sino únicamente a través de la percepción y experiencia de los propios hogares. El cuestionario contempló una pregunta clave: “¿Produce usted vegetales que come normalmente en su dieta?”, cuyas respuestas permitieron distinguir entre hogares con experiencia productiva previa y aquellos sin ella.

En los casos en que la respuesta fue negativa, se registraron las barreras percibidas para no producir, tales como falta de espacio, falta de información, desconocimiento, falta de tiempo, plagas o enfermedades. Adicionalmente, se preguntó sobre los factores ambientales considerados como importantes para el cultivo de alimentos vegetales en el hogar (agua, suelo, luz solar, plagas, semilla, aire).

La validez de contenido de la encuesta se garantizó mediante la revisión por parte del comité tutoral y la comparación con antecedentes de estudios en agricultura urbana y adopción de huertos familiares. Asimismo, se aplicó una prueba piloto a un subconjunto reducido de hogares, lo que permitió verificar la claridad de las preguntas y realizar ajustes mínimos en su redacción. Este proceso aseguró la confiabilidad básica del instrumento y la pertinencia de los datos recolectados.



En conjunto, la información obtenida permite complementar la caracterización socioambiental de los hogares y evaluar el grado de conocimientos familiares que inciden en la adopción de huertos urbanos.

Los procedimientos experimentales descritos en las secciones anteriores—establecimiento de huertos (3.3.1-3.3.5), monitoreo climático (3.3.6), inventario energético (3.3.7), registro productivo (3.3.8) y caracterización socioambiental (3.3.9)—generaron datos que se organizaron en cuatro dimensiones de variables de respuesta: (1) producción y rendimiento agronómico, (2) eficiencia térmica y aprovechamiento climático, (3) autonomía energética y sostenibilidad energética, y (4) eficiencia técnica mediante frontera estocástica. Esta estructura multidimensional permite la evaluación integral de la sostenibilidad de los huertos urbanos familiares.

3.4 Variables de respuesta

3.4.1 Producción y rendimiento agronómico

Rendimiento fresco por especie.

El experimento incluyó 144 plantas (12 réplicas \times 4 especies \times 3 huertos). La unidad de análisis primaria fue la planta individual (kg/planta). Para contextualización práctica, el rendimiento se expresó también como kg/m², calculado sobre la superficie efectiva real de cada huerto (7.61 m²; 0.159 m²/planta), evitando extrapolaciones a hectárea que no representan la escala de huertos urbanos familiares. La medición se realizó mediante pesaje directo con balanza analítica (± 0.1 g), siguiendo el protocolo descrito en la sección 3.3.8. Se ajustó a la fenología de cada cultivo: jitomate (evaluación semanal, 8 semanas), lechuga y espinaca (cosecha única), acelga (cosecha escalonada cada 15 días durante 6 semanas).



Biomasa acumulada total.

Se calculó como la suma de rendimientos de todas las especies en cada sitio experimental:

$$Biomasa\ total = \sum_{i=1}^4 Rendimiento_i \times Número\ de\ plantas_i$$

Productividad comparativa.

Se determinó el rendimiento relativo de cada especie respecto al promedio del sistema:

$$ProdRel_i = \frac{Y_i}{\bar{Y}_{sistema}} \times 100$$

Donde $ProdRel_i$ es el rendimiento fresco de la unidad i y $\bar{Y}_{sistema}$ es el promedio de todas las unidades evaluadas (misma especie y periodo).

3.4.2 Eficiencia térmica y aprovechamiento climático

Eficiencia térmica.

Relación entre rendimiento fresco (kg) y grados-día acumulados del ciclo:

$$Eficiencia\ térmica = \frac{Rendimiento\ fresco = Y_i\ (kg)}{GDD\ acumulados\ (^\circ C \cdot día)}$$

Aprovechamiento térmico.

Porcentaje de grados-día utilizados respecto a los disponibles en el período experimental:

$$Aprovechamiento\ térmico\ (\%) = \frac{GDD\ utilizados}{GDD\ disponibles} \times 100$$

Integral térmica total.

Se estimó como la suma de grados-día acumulados desde siembra hasta cosecha final de cada especie.



3.4.3 Autonomía energética y sostenibilidad energética

Transformicidad.

$$\tau = \frac{\text{Emergía total del sistema (se)}}{\text{Energía disponible del producto (J)}}$$

Estructura de renovabilidad.

Se calcularon las proporciones relativas de recursos renovables (R), no renovables (N) e insumos de la economía (F):

$$\%R = \frac{R}{U} \times 100, \quad \%N = \frac{N}{U} \times 100, \quad \%F = \frac{F}{U} \times 100$$

Índices energéticos.

$$EYR = \frac{\text{Emergía del producto}}{F}$$

$$ELR = \frac{N + F}{R}$$

$$ESI = \frac{EYR}{ELR}$$

Grado de autonomía energética.

Se expresó en escala 0–1, integrando los indicadores anteriores.

3.4.4 Eficiencia técnica y optimización productiva

Eficiencia técnica (ET).

Estimación derivada del modelo de frontera estocástica de producción:

$$ET_i = \exp(-\hat{u}_i)$$



Elasticidades insumo-producto.

Se calcularon con un modelo Cobb-Douglas:

$$\ln(Y_i) = \beta_0 + \beta_1 \ln(TR_i) + \beta_2 \ln(VA_i) + \beta_3 \ln(LO_i) + v_i - u_i$$

Elasticidades insumo-producto:

Trabajo humano:

$$\beta_1 = \frac{\partial \ln(Y)}{\partial \ln(TR)}$$

Agua:

$$\beta_2 = \frac{\partial \ln(Y)}{\partial \ln(VA)}$$

Lombricomposta:

$$\beta_3 = \frac{\partial \ln(Y)}{\partial \ln(LO)}$$

Rendimientos a escala (RTS):

La suma de elasticidades determina los rendimientos a escala:

$$RTS = \beta_1 + \beta_2 + \beta_3$$

Determinantes ambientales de la ineficiencia.

Se incluyeron grados-día (GDD) y energía total (EM) como variables explicativas de la ineficiencia:

$$\mu_i = \delta_0 + \delta_1 GDD_i + \delta_2 EM_i$$

Eficiencia técnica condicional.

Se calculó ajustando por GDD y EM:

$$ET_i^{cond} = \exp(-\hat{u}_i | GDD_i, EM_i)$$



3.4.5 Variables de sustentabilidad integral del sistema

3.4.5.1 Capacidad de autosostenimiento

Se calculó como una variable síntesis que integra renovabilidad emergética, sostenibilidad emergética, carga ambiental y eficiencia técnica. La fórmula empleada fue:

$$\text{Autosostenimiento} = 0.3 \times \%R + 0.25 \times ESI + 0.25 \times (2 - ELR^{-1}) + 0.2 \times ET$$

donde **%R** corresponde a la proporción de recursos renovables, **ESI** al índice de sostenibilidad emergética, **ELR** a la razón de carga ambiental, y **ET** a la eficiencia técnica promedio estimado por el modelo SFA (Odum, 1996; Brown & Ulgiati, 2004; Avalos-Rangel et al., 2021; Kumbhakar & Lovell, 2000).

Los valores se clasificaron en tres rangos: alta capacidad (≥ 0.75), moderada (0.50–0.74) y limitada (< 0.50).

3.4.5.2 Resiliencia productiva

Se estimó a partir de la estabilidad del rendimiento entre sitios y especies, integrando variabilidad espacial, diversidad productiva y uniformidad del sistema. La fórmula aplicada fue:

$$\text{Resiliencia} = \left(1 - \frac{CV_{\text{sitios}}}{100}\right) \times \left(1 - \frac{CV_{\text{especies}}}{100}\right) \times \left(\frac{\text{Rendimiento mínimo}}{\text{Rendimiento máximo}}\right)$$

donde CV_{sitios} es el coeficiente de variación del rendimiento entre los tres sitios experimentales y CV_{especies} corresponde a la variabilidad entre jitomate, lechuga, acelga y espinaca. La relación rendimiento mínimo/máximo refleja la capacidad del sistema de mantener producción en escenarios de estrés (Lin, 2011; Oke et al., 2017).



3.4.5.3 Viabilidad del modelo urbano familiar

La viabilidad se calculó como un índice compuesto derivado de tres dimensiones metodológicas:

Factibilidad técnica: ET promedio ≥ 0.70 , EYR > 1.2 y aprovechamiento de GDD $> 60\%$ (Battese & Coelli, 1995; McMaster & Wilhelm, 1997).

Sostenibilidad energética: %R $\geq 55\%$, ESI ≥ 2 y ELR ≤ 4 (Odum, 1996; Brown & Ulgiati, 2004).

Practicidad de replicación: requerimiento de superficie mínima ($\geq 6 \text{ m}^2$), inversión inicial por m^2 y tiempo de trabajo semanal (2–3 h) (Cruz, 2016; Villavicencio-Valdez et al., 2023).

El índice final se expresó como:

$$\text{Viabilidad} = \frac{\text{Factibilidad técnica} + \text{Sostenibilidad energética} + \text{Practicidad de replicación}}{3}$$

con valores ≥ 0.65 interpretados como viabilidad favorable para replicación en ciudades intermedias mexicanas (Nicholls et al., 2020; Urías & Ochoa, 2020).

3.5 Preparación y construcción del dataset analítico

3.5.1 Consolidación y validación de datos experimentales

3.5.1.1 Trazabilidad y control de calidad

Se aplicó un sistema de doble registro para garantizar la integridad de los datos productivos, climáticos y energéticos. Cada variable medida (rendimiento fresco, GDD diarios, flujos de insumos) se documentó en bitácoras de campo con códigos únicos por planta y posteriormente se consolidó digitalmente de forma semanal, con verificación cruzada entre observadores independientes (Hernández-Sampieri et al., 2018).

La calidad de las series de rendimiento y temperatura se evaluó con la prueba de Grubbs ($\alpha = 0.05$) para identificar valores atípicos (Steel et al., 1997). Los casos atribuibles a errores



instrumentales se corrigieron por interpolación lineal, mientras que los valores extremos climáticos confirmados se conservaron para preservar la representatividad del periodo experimental.

3.5.1.2 Estandarización de unidades y escalas

Las mediciones se expresaron en unidades acordes con la escala real de huertos urbanos familiares: rendimiento individual (kg/planta) $\rightarrow Y_i$, rendimiento por superficie efectiva (kg/m²) y producción total por sitio experimental (kg/5.90 m²) (Muñoz-Nuñez et al., 2025). Se descartaron extrapolaciones a hectárea para mantener relevancia práctica en contextos urbanos donde las superficies se limitan a patios y azoteas (SMADSOT, 2022).

Los flujos emergéticos se reportaron en seJ/m²/ciclo y los GDD en °C·días acumulados por especie y sitio, siguiendo estándares de estudios agrícolas en pequeña escala (McMaster & Wilhelm, 1997).

3.5.1.3 Estructuración jerárquica de datos

La base de datos se organizó con la estructura anidada del diseño experimental: 144 plantas (nivel 1), agrupadas en cuatro especies hortícolas (nivel 2) y distribuidas en tres sitios urbanos (nivel 3) (Pinheiro & Bates, 2000). Se asignaron identificadores alfanuméricos únicos por nivel (P001–P144 para plantas, JIT/LEC/ACE/ESP para especies, S1/S2/S3 para sitios). Esta organización permitió análisis con modelos lineales mixtos, descomponiendo la varianza productiva en efectos de especie, heterogeneidad espacial y variabilidad individual.

3.5.2 Preparación para análisis emergético

3.5.2.1 Conversión de flujos a unidades emergéticas

Los flujos físicos se transformaron a emjoules solares (seJ) aplicando valores unitarios de emergía (UEV) documentados en la literatura. Se utilizó la línea base geobiosférica de 15.83E+24 seJ/año (Brown et al., 2016). Los UEV empleados incluyeron: lombricomposta (1.48E+09 seJ/g),



trabajo humano (1.20E+07 seJ/J), agua potable (1.51E+06 seJ/g) y energía solar (1.00 seJ/J) (Odum, 1996).

Cuando las fuentes originales usaron baselines distintos, los valores se ajustaron para asegurar comparabilidad (Avalos-Rangel et al., 2021).

3.5.2.2 Clasificación y agregación de flujos

Los insumos se clasificaron en tres categorías (Odum, 1996):

- Recursos renovables locales (R): energía solar y precipitación.
- Recursos no renovables locales (N): suelo base y tezontle.
- Insumos de la economía (F): lombricomposta, contenedores, herramientas y trabajo humano.
- Se calculó emergía total ($U = R + N + F$) y emergía del producto (Y) para cada sitio experimental. La agregación evitó doble contabilización y mantuvo coherencia dimensional (Brown & Ulgiati, 2004).

3.5.2.3 Cálculo de indicadores emergéticos

Se estimaron indicadores clave mediante fórmulas estándar:

Transformicidad ($\tau = Y/E_p$).

Razón de rendimiento emergético ($EYR = Y/F$).

Razón de carga ambiental ($ELR = (N+F)/R$).

Índice de sostenibilidad emergética ($ESI = EYR/ELR$).

Asimismo, se calcularon porcentajes de renovabilidad: $\%R = (R/U) \times 100$. Los criterios de interpretación siguieron a Avalos-Rangel et al. (2021): $ESI > 2$ indica sostenibilidad moderada, $ELR < 3$ presión ambiental baja y $EYR > 1.2$ uso eficiente de recursos locales.



3.5.3 Preparación para modelado de frontera estocástica

3.5.3.1 Transformación logarítmica de variables

La variable dependiente $\ln(Y_i)$ y los insumos $\ln(\text{TR})$, $\ln(\text{VA})$, $\ln(\text{LO})$ se transformaron a logaritmos naturales bajo la especificación Cobb-Douglas (Battese & Coelli, 1995). Esta transformación permitió interpretar coeficientes como elasticidades insumo-producto y linealizó las relaciones multiplicativas. Se previno la presencia de ceros añadiendo una constante mínima (0.001), garantizando propiedades estadísticas (Kumbhakar & Lovell, 2000).

3.5.3.2 Incorporación de determinantes ambientales

Se incluyeron GDD acumulados y energía total (EM) como determinantes de ineficiencia técnica, con la formulación $u_i = \delta_0 + \delta_1 \text{GDD}_i + \delta_2 \text{EM}_i$ (Battese & Coelli, 1995). Esta integración permitió evaluar la influencia de factores térmicos y energéticos sobre la eficiencia productiva en huertos urbanos (Muñoz-Nuñez et al., 2025). Para garantizar comparabilidad, ambas variables se estandarizaron (media cero, desviación estándar uno).

3.5.3.3 Especificación del modelo econométrico

El modelo SFA se planteó con error compuesto $\varepsilon_i = v_i - u_i$, donde $v_i \sim N(0, \sigma_v^2)$ es el error aleatorio y $u_i \geq 0$ representa ineficiencia técnica, distribuida half-normal truncada en u_i (Greene, 2005). La estimación se realizó por máxima verosimilitud con algoritmo Newton-Raphson, criterio de convergencia 10^{-6} y tratamiento de efectos fijos por especie mediante variables dummy.

Se estimaron parámetros σ_u^2 y σ_v^2 para descomposición de varianza, y eficiencias técnicas individuales $\text{ET}_i = \exp(-\hat{u}_i)$ (Coelli et al., 2005).



3.5.4 Control de calidad estadística y limitaciones

3.5.4.1 Diagnósticos estadísticos

Se aplicaron:

Prueba de Shapiro-Wilk ($\alpha = 0.05$) para normalidad de residuos.

Breusch-Pagan para homocedasticidad.

Factores de inflación de varianza ($VIF < 5.0$) para multicolinealidad.

Prueba de Grubbs en residuos estandarizados para detectar atípicos.

Los supuestos del SFA se validaron mediante análisis de distribución del término de ineficiencia y prueba de Hausman para comparar frente a modelos determinísticos (Greene, 2005). Los diagnósticos confirmaron adecuación del modelo.

3.5.4.2 Validación de consistencia dimensional

Se verificó coherencia en todas las unidades: rendimientos en kg, insumos energéticos en seJ, trabajo en horas, GDD en $^{\circ}\text{C}\cdot\text{día}$. Los indicadores energéticos se validaron por balance de unidades (ej. seJ/seJ, seJ/J). Las elasticidades del SFA se interpretaron como cambios porcentuales, manteniendo consistencia dimensional.

3.5.4.3 Limitaciones metodológicas reconocidas

Las limitaciones identificadas incluyen: tamaño muestral restringido (144 plantas, 3 sitios), representación temporal de un solo ciclo productivo (febrero–mayo 2022), y condiciones controladas que reducen extrapolación a huertos urbanos reales más heterogéneos. La falta de réplicas interanuales limita el análisis de estabilidad temporal. Se reconoce la necesidad de validar en condiciones menos controladas para fortalecer la generalización (Yin, 2018).



3.6 Métodos de análisis estadístico

3.6.1 *Análisis descriptivo y exploratorio*

3.6.1.1 *Estadísticas descriptivas de producción*

Se calcularon medidas de tendencia central (media, mediana) y dispersión (desviación estándar, coeficiente de variación) para rendimiento fresco por especie (Y_i) y sitio experimental, utilizando R versión 4.3.0 (R Core Team, 2023). Se aplicó un ANOVA bifactorial para evaluar efectos principales de especie y sitio, así como su interacción (Steel et al., 1997). Las diferencias significativas se identificaron con prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$). En jitomate y acelga se calcularon estadísticas descriptivas por fases fenológicas para capturar patrones temporales de cosecha (Pinheiro & Bates, 2000).

3.6.1.2 *Análisis de correlaciones*

Se elaboraron matrices de correlación de Pearson entre variables productivas (rendimiento por especie), climáticas (GDD acumulados, temperatura media) y energéticas (energía total, transformicidad, EYR, ELR, ESI). Se consideraron asociaciones significativas a $p < 0.05$, aplicando corrección de Bonferroni para comparaciones múltiples (Hernández-Sampieri et al., 2018). La magnitud de correlaciones se interpretó como fuerte ($r > 0.7$), moderada (0.4–0.7) o débil (0.2–0.4). Los supuestos de linealidad y normalidad bivariada se verificaron mediante análisis de residuos. Se generaron mapas de calor para visualizar la estructura de correlaciones.

3.6.1.3 *Visualización de datos*

Se empleó el paquete ggplot2 para graficar distribuciones de rendimiento por especie (boxplots), series de GDD acumulados (líneas con IC95%), y diagramas de flujos energéticos con simbología estándar de Odum (1996). Los flujos se representaron proporcionalmente a magnitudes



energéticas calculadas. La visualización siguió principios de claridad interpretativa y consistencia dimensional (Tufté, 2001).

3.6.2 Modelado de frontera estocástica de producción

3.6.2.1 Estimación de parámetros

El modelo se estimó mediante máxima verosimilitud con el paquete frontier de R, usando algoritmo Newton-Raphson y criterio de convergencia 10^{-6} (Coelli & Henningsen, 2013). El término de ineficiencia u_{i_iui} se modeló con distribución half-normal y el error aleatorio v_{i_ivi} como normal estándar (Battese & Coelli, 1995). La significancia de coeficientes se evaluó con pruebas t ($\alpha = 0.05$). La bondad de ajuste se verificó mediante log-verosimilitud, AIC, BIC y pruebas de razón de verosimilitud frente a modelos determinísticos (Greene, 2005).

3.6.2.2 Cálculo de eficiencias técnicas

Las eficiencias técnicas individuales se calcularon como:

$$ET_i = \exp(-\widehat{u}_i)$$

donde u_i corresponde al mejor predictor insesgado (BLUP) del término de ineficiencia (Battese & Coelli, 1995). Se describió la distribución de ET (media, mediana, rango, cuartiles) y se clasificaron plantas con $ET > 0.90$ (alta eficiencia) y $ET < 0.70$ (baja eficiencia). Se generaron histogramas de eficiencias por especie y sitio, y se calcularon brechas de mejora como $(1 - ET) \times 100$, expresando el potencial de incremento productivo sin cambios tecnológicos (Kumbhakar & Lovell, 2000).

3.6.2.3 Interpretación de elasticidades

Los coeficientes β de la especificación Cobb-Douglas se interpretaron como elasticidades insumo-producto: trabajo β_1 agua β_2 y lombricomposta β_3 . Se calculó la suma de elasticidades:

$$RTS = \beta_1 + \beta_2 + \beta_3$$



para determinar rendimientos a escala ($RTS = 1$ constantes, $RTS > 1$ crecientes, $RTS < 1$ decrecientes). Se identificó el insumo limitante según magnitud y significancia de elasticidades, aplicando IC95% y análisis de sensibilidad para validar robustez de resultados (Battese & Coelli, 1995).

3.6.3 Evaluación integral de sostenibilidad

3.6.3.1 Síntesis de indicadores emergéticos

Se integraron transformicidad, %R, EYR, ELR y ESI comparándolos con benchmarks de sistemas agroecológicos (Brown & Ulgiati, 2004; Avalos-Rangel et al., 2021). Para identificar patrones se aplicó análisis de componentes principales (PCA). Los resultados se contrastaron con valores de referencia: agricultura urbana (EYR > 1.2, ELR < 4, ESI > 2) vs. convencional (EYR < 1.1, ELR > 6, ESI < 1) (Odum, 1996; Campbell & Lu, 2024).

3.6.3.2 Integración de resultados multidimensionales

Se construyó una matriz de evaluación con cuatro dimensiones: productiva (kg/m^2) → proviene de Y_i , térmica (kg/GDD), emergética (indicadores de sostenibilidad) y eficiencia técnica (ET promedio). Las variables se estandarizaron mediante Z-scores para garantizar comparabilidad. Se aplicó análisis de conglomerados jerárquico (Ward, distancia euclidiana) y se validó con análisis discriminante (Hair et al., 2019). Los perfiles de desempeño se representaron en radar charts multidimensionales.

3.6.3.3 Validación de hipótesis

La contrastación se realizó mediante pruebas específicas:

Hipótesis 1: regresión múltiple entre variables ambientales y autonomía emergética.

Hipótesis 2: correlación entre la integral térmica (GDD) y el rendimiento por especie.



Hipótesis 3: integración de modelos, donde la sostenibilidad del huerto urbano se evaluó a partir de la convergencia entre los indicadores emergéticos (EYR, ELR, ESI, %R), la integral térmica (GDD) y la eficiencia técnica estimada mediante fronteras estocásticas de producción (SFA). De esta manera, el análisis de frontera estocástica funcionó como modelo integrador que articuló simultáneamente los resultados térmicos y energéticos para explicar la eficiencia y la capacidad de sostenibilidad del sistema.

3.6.3.4 Notas metodológicas de referencia comparativa

Esta investigación no incorpora un diseño comparativo entre huertos urbanos y otros sistemas agrícolas. El análisis se limita a los huertos urbanos familiares estudiados en Puebla.

Los valores de milpa, agricultura convencional y otros sistemas productivos que aparecen en los resultados provienen de la literatura científica (Avalos-Rangel et al., 2021; Rangel, 2019; McDougall et al., 2018) y se incluyen únicamente con fines de contextualización. Estos datos no fueron medidos en el presente estudio, ni forman parte del diseño experimental, sino que sirven como referencias bibliográficas para dimensionar los indicadores emergéticos y de sostenibilidad de los huertos urbanos.

De este modo, se asegura la coherencia del trabajo: el objeto central de análisis sigue siendo exclusivamente el sistema de huertos urbanos familiares de Puebla.

3.7 Especificación completa del modelo SFA

3.7.1 Modelo y determinantes de la ineficiencia

El modelo de frontera estocástica se especificó en forma Cobb-Douglas, incorporando variables de insumo y dummies de especie:

$$\ln(Y_i) = \beta_0 + \beta_1 \ln(TR_i) + \beta_2 \ln(VA_i) + \beta_3 \ln(LO_i) + \beta_4 D_{JIT,i} + \beta_5 D_{LEC,i} \\ + \beta_6 D_{ESP,i} + v_i - u_i$$



donde:

Y_i : rendimiento fresco de la planta i (kg/planta).

TR_i : trabajo humano (h/planta).

VA_i : volumen de agua aplicado (L/planta).

LO_i : lombricomposta (kg/planta).

$D_{JIT}, D_{LEC}, D_{ESP}$: variables dummy (acelga como base).

$v_i \sim N(0, \sigma_v^2)$: error aleatorio.

$u_i \geq 0$: ineficiencia técnica.

Los determinantes de la ineficiencia se modelaron como:

$$\mu_i = \delta_0 + \delta_1 GDD_i + \delta_2 EM_i + \delta_3 S_{2i} + \delta_4 S_{3i}$$

donde GDD_i corresponde a grados-día acumulados, EM_i a energía total por planta (seJ), y S_{2i}, S_{3i} son dummies de sitio (sitio 1 como base). El término de ineficiencia sigue

$$u_i \sim N^+(\mu_i, \sigma_u^2).$$

Las varianzas se definieron como:

$$\sigma^2 = \sigma_v^2 + \sigma_u^2, \quad \gamma = \frac{\sigma_u^2}{\sigma_v^2 + \sigma_u^2}$$

donde γ indica la proporción de la varianza total atribuible a ineficiencia.

La eficiencia técnica individual se calculó como:

$$ET_i = \exp(-\widehat{u}_i)$$
$$ET_i = E[\exp(-ui) | \varepsilon_i] = \frac{\Phi\left(\frac{\sigma_u \varepsilon_i}{\sigma_v \sigma} - \frac{\sigma_u \mu_i}{\sigma_v^2}\right)}{\Phi\left(-\frac{\mu_i \sigma_u}{\sigma_v^2}\right)} \exp\left(-\frac{\varepsilon_i \mu_i}{\sigma^2} + \frac{\mu_i^2}{2\sigma_v^2}\right)$$



con $\boldsymbol{\varepsilon i} = \boldsymbol{vi} - \boldsymbol{ui}$.

3.7.2 Software y paquetes utilizados

El análisis se realizó en R 4.3.0 (R Core Team, 2023) en Windows 11, empleando RStudio (2023.06.1).

Paquetes SFA: frontier (Coelli & Henningsen, 2013), sfa y plm (Croissant & Millo, 2019).

Complementarios: tidyverse (gestión de datos), corrplot (correlaciones), car y lmtest (diagnósticos econométricos), moments (estadísticos de normalidad).

Configuración de estimación: algoritmo Newton-Raphson (máx. 100 iteraciones, tolerancia 10^{-6}), inicialización por OLS.

3.7.3 Valores unitarios de emergía (UEV)

Se utilizó baseline geobiosférico de 15.83×10^{24} seJ·a⁻¹ (Brown et al., 2016). Todos los UEV se ajustaron a esta referencia.

Renovables (R): energía solar (1.00 seJ/J), precipitación (3.05E+04 seJ/J), viento (2.45E+03 seJ/J).

No renovables (N): suelo urbano (1.24E+05 seJ/J), tezontle (1.09E+06 seJ/g).

Económicos (F): lombricomposta (1.48E+09 seJ/g), agua potable (1.51E+06 seJ/g), trabajo humano (1.20E+07 seJ/J), perlita (3.82E+06 seJ/g), vermiculita (3.95E+06 seJ/g), polietileno (5.41E+06 seJ/g).

3.7.4 Convergencia y diagnósticos

Convergencia: $\|\nabla L\| < 10^{-6}$, cambio relativo en parámetros $< 10^{-6}$, cambio en log-verosimilitud $< 10^{-8}$, máx. 100 iteraciones.

Especificación: prueba LR para $H_0: \boldsymbol{\gamma} = \mathbf{0}$.



Supuestos: Shapiro-Wilk (residuos), Kolmogorov-Smirnov (eficiencias), Breusch-Pagan (homocedasticidad).

Multicolinealidad: $VIF < 5$ considerado aceptable.

Bondad de ajuste: AIC, BIC, log-verosimilitud, R^2 generalizado, ET media esperada entre 0.70–0.95 (Battese & Coelli, 1995).

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Saberes familiares y barreras percibidas

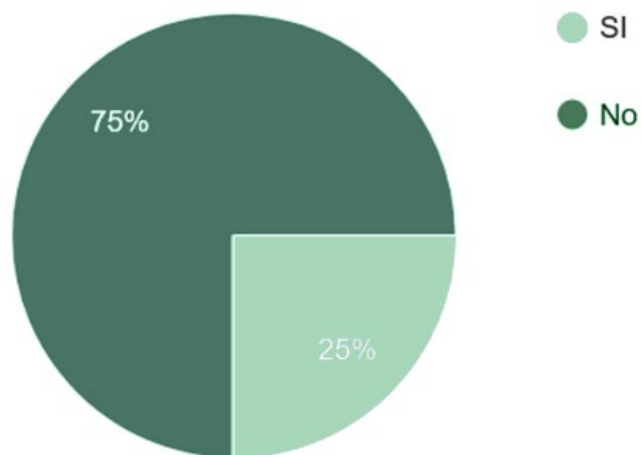
La encuesta socioambiental aplicada a 240 hogares permitió caracterizar los saberes previos en producción hortícola. Los resultados revelaron que el 25% (n=60) de los hogares encuestados ya producían vegetales de consumo habitual, mientras que el 75% (n=180) no lo hacían (Figura 8). Esta distribución evidencia un potencial significativo de adopción de huertos urbanos familiares en la población estudiada.

Figura 8.

Producción de vegetales entre los hogares encuestados.

¿Produce usted vegetales que come normalmente en su dieta?

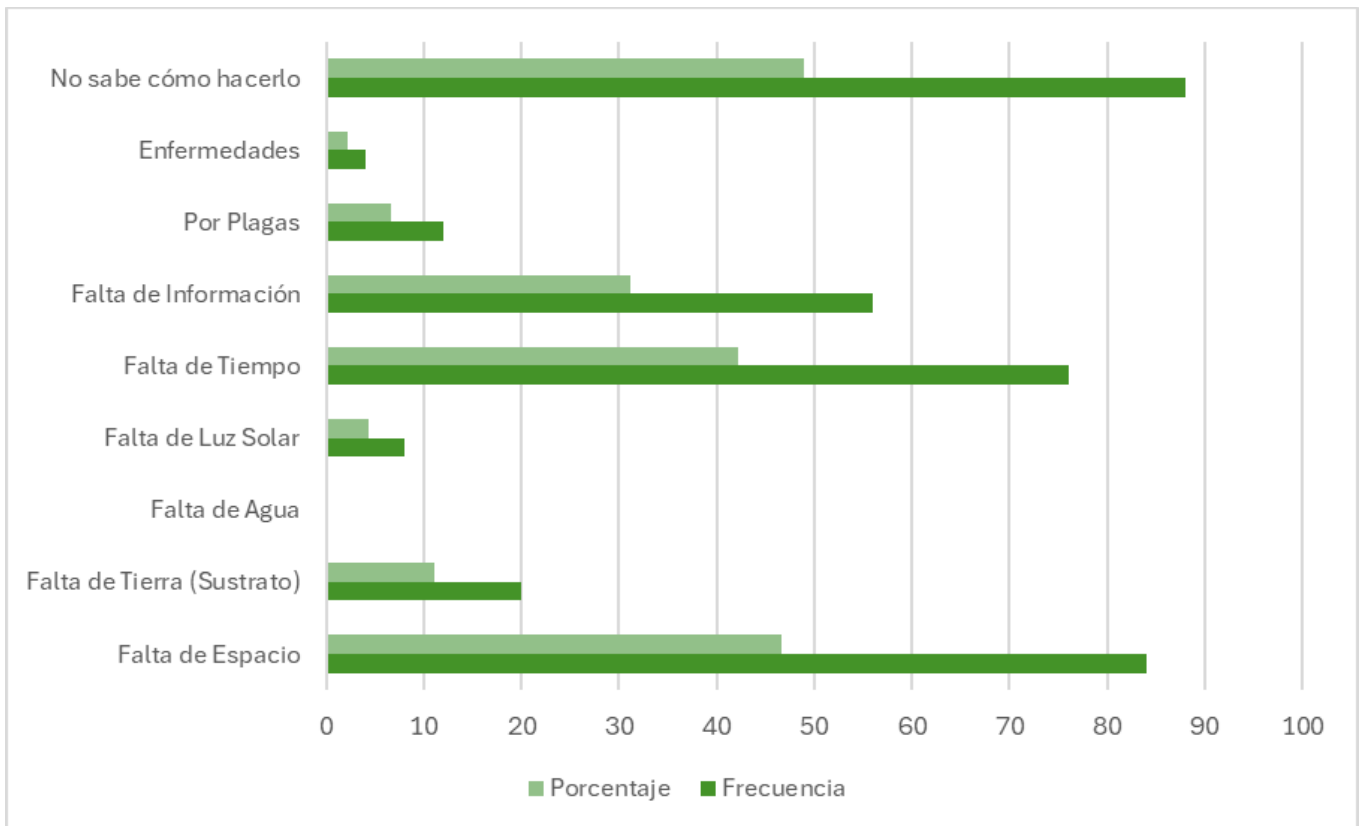
240 respuestas



Entre los hogares que no producían (n=180), las principales barreras identificadas fueron la falta de espacio (46.7%, n=84), la falta de información (31.1%, n=56), la falta de tiempo (42.2%, n=76), el desconocimiento técnico reflejado en “no sabe cómo hacerlo” (48.9%, n=88), y en menor medida la falta de tierra (11.1%, n=20), la falta de luz solar (4.4%, n=8), la presencia de plagas (6.7%, n=12) y enfermedades (2.2%, n=4). La predominancia de barreras relacionadas con el conocimiento y la información sugiere que programas de capacitación técnica podrían incrementar significativamente las tasas de adopción de huertos urbanos en contextos familiares (figura 9).

Figura 9.

Frecuencia y porcentaje de barreras reportadas por los hogares que no producen vegetales



Respecto a los factores ambientales considerados importantes para el cultivo doméstico, el 95% (n=228) de los hogares identificó el suelo como un elemento crítico, seguido por el agua



(88.3%, n=212), la luz solar (81.7%, n=196), el control de plagas (65%, n=156), la calidad de la semilla (58.3%, n=140) y la calidad del aire (45%, n=108). Esta jerarquización refleja una comprensión básica pero adecuada de los requerimientos biofísicos fundamentales para la producción hortícola y muestra que, aunque existe un déficit en la práctica productiva previa, los hogares poseen cierta noción sobre los factores ambientales necesarios para el éxito de los huertos urbanos.

4.2 Caracterización productiva de huertos urbanos familiares

4.2.1 Rendimiento y biomasa por especie

El análisis productivo de los huertos urbanos familiares reveló patrones diferenciados que confirman la viabilidad del sistema. Los resultados de 144 plantas distribuidas en cuatro especies hortícolas (*Solanum lycopersicum*, *Lactuca sativa*, *Beta vulgaris* var. *cicla* y *Spinacia oleracea*) en tres sitios experimentales urbanos de Puebla revelaron diferencias significativas tanto entre especies como entre sitios de cultivo (Tabla 4).

Tabla 4.

Rendimiento promedio por planta (g) de especies hortícolas en huertos urbanos familiares de Puebla

Espece	Sitio 1 (Mayorazgo)	Sitio 2 (Mayorazgo)	Sitio 3 (Tres Cruces)	Promedio general	CV (%)
Acelga (<i>Beta vulgaris</i> var. <i>cicla</i>)	580.6 ± 43.2	495.8 ± 38.7	515.5 ± 42.1	530.6 ± 44.8	8.4
Espinaca (<i>Spinacia oleracea</i>)	242.5 ± 18.9	230.3 ± 17.1	227.7 ± 16.8	233.5 ± 18.0	7.7
Lechuga (<i>Lactuca sativa</i>)	331.1 ± 26.2	319.1 ± 22.8	328.1 ± 24.5	326.1 ± 24.5	7.5
Tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>)	551.3 ± 42.4	625.8 ± 48.3	451.3 ± 35.2	542.8 ± 87.5	16.1

Nota. Los valores representan media ± desviación estándar de 12 plantas por especie y sitio. CV = Coeficiente de variación.



Los resultados de la Tabla 4 revelan diferencias significativas tanto entre especies como entre sitios. La acelga se consolidó como la especie de mayor rendimiento (530.6 g/planta, CV = 8.4%), seguida por el tomate (542.8 g/planta), aunque este último presentó mayor variabilidad (CV = 16.1%). Las hortalizas de hoja restantes—lechuga (326.1 g/planta) y espinaca (233.5 g/planta)—mostraron rendimientos menores, pero con alta estabilidad (CV < 8%), característica valiosa para la predictibilidad productiva en huertos urbanos familiares.

El tomate alcanzó un promedio de 542.8 g/planta; sin embargo, este valor representa apenas un 12% del rendimiento mínimo esperado en agricultura convencional (≈ 4.5 kg/planta; Gobierno de México, 2020). Por ello, aunque numéricamente aparece elevado frente a otras hortalizas del huerto urbano, su desempeño real en términos comparativos con sistemas comerciales resulta bajo. Además, presentó la mayor variabilidad (CV = 16.1%), lo que sugiere alta sensibilidad a microclimas urbanos y confirma que su cultivo en estas condiciones es menos confiable que el de especies de hoja.

La desviación estándar (\pm) que acompaña a cada media representa cuánto se alejan, en promedio, los valores individuales respecto a la media. Por ejemplo, la acelga tuvo 580.6 ± 43.2 g



Figura 10.

Ejemplares de Lactuca sativa cosechados en huertos urbanos familiares de Puebla. La imagen evidencia biomasa comercial adecuada y variabilidad moderada, consistente con los valores de coeficiente de variación (CV = 7.5%) reportados en la Tabla 3. (fotografía de elaboración propia, 2022).



en el Sitio 1: esto significa que la mayoría de las plantas oscilaron en un rango de ± 43 g alrededor del promedio. El coeficiente de variación (CV%) expresa esa variabilidad en términos relativos, comparando la magnitud de la desviación estándar respecto a la media; valores bajos (menores a 10%) indican homogeneidad, mientras que valores altos ($>15\%$) reflejan gran dispersión entre plantas.

En las hortalizas de hoja, la lechuga y la espinaca destacaron por su uniformidad productiva. Como se aprecia en la Figura 10, la lechuga alcanzó un tamaño comercial adecuado con diferencias moderadas entre individuos, consistente con su CV de 7.5%. Por su parte, la espinaca mostró rendimientos más bajos en promedio, pero con alta homogeneidad, evidenciada en la Figura 11, donde la biomasa aérea y radicular se mantienen relativamente estables entre plantas. Esta uniformidad la convierte en una especie predecible y de bajo riesgo productivo en huertos urbanos familiares.

Figura 11.

Ejemplares de Spinacia oleracea cosechados en huertos urbanos familiares de Puebla. Se observa homogeneidad en el tamaño y biomasa radicular, lo que coincide con el bajo coeficiente de variación (CV = 7.7%) registrado en la Tabla 4. (fotografía de elaboración propia, 2022).



En contraste, el tomate mostró diferencias marcadas entre sitios, con un máximo de 625.8 g/planta en el Sitio 2 y un mínimo de 451.3 g/planta en el Sitio 3, lo que representa una diferencia de 38.7%. Este comportamiento refuerza la necesidad de estrategias de manejo más estrictas



(riego, radiación y protección contra viento) para lograr rendimientos aceptables en el contexto urbano. El protocolo de inocuidad agroecológica implementado (agua potable municipal, lombricomposta certificada, eliminación total de agroquímicos) se ejecutó exitosamente en los tres sitios, garantizando producción de alimentos seguros sin requerir verificación analítica posterior, coherente con el enfoque preventivo adoptado de las buenas prácticas de manejo.

4.2.2 Desempeño comparativo entre especies hortícolas

El análisis comparativo confirma que la acelga se estableció como la especie más confiable en el sistema urbano, combinando el mayor rendimiento promedio con estabilidad entre sitios. La lechuga y la espinaca, aunque de menor biomasa, presentaron uniformidad destacada (diferencias inter-sitios <5%), atributo relevante para la planificación de huertos familiares.

En contraste, el tomate mostró sensibilidad marcada a las condiciones micro climáticas: mientras en el Sitio 2 superó los 625 g/planta, en el Sitio 3 apenas alcanzó 451 g/planta, con una diferencia de casi 40% entre ambientes. Esta variabilidad refuerza la necesidad de interpretarlo no como un cultivo de alto rendimiento absoluto en huertos urbanos, sino como una especie que puede aportar volumen, pero con fuerte dependencia del microclima y de factores de manejo como exposición solar, viento y disponibilidad hídrica (García Bustamante, 2024).

4.2.3 Productividad del sistema integrado

La biomasa total acumulada alcanzó 58,789 g en 22.83 m², equivalente a un rendimiento promedio de 2.57 kg/m² por ciclo productivo (Tabla 5). Estos valores son competitivos frente a reportes de agricultura urbana documentados en la literatura y evidencian un uso intensivo y eficiente del espacio en contextos de fuerte limitación de suelo.



Tabla 5.*Rendimientos promedios por ciclo de cultivo.*

Indicador	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Promedio	Total
Producción total (g)	20,466	20,052	18,271	19,596	58,789
Superficie efectiva (m ²)	7.61	7.61	7.61	7.61	22.83
Rendimiento (kg/m ²)	2.69	2.63	2.4	2.57	–
Número de plantas	48	48	48	48	144
Rendimiento por planta (g)	426.4	417.8	380.6	408.3	–
Densidad (plantas/m ²)	6.31	6.31	6.31	6.31	–

La distribución de la producción mostró que la acelga aportó el 35.4% del total, seguida por el tomate con 32.4%, la lechuga con 20.1% y la espinaca con 12.1%. Esta diversidad productiva optimiza el uso del espacio y confirma que la combinación de especies de hoja con frutos permite maximizar tanto biomasa como estabilidad del sistema (Villavicencio-Valdez et al., 2023).

El potencial de escalamiento se estimó en 15.4 kg por ciclo para un huerto de 6 m², suficiente para complementar significativamente la dieta de una familia de 3–4 integrantes durante 2–3 semanas, consistente con estimaciones previas de Gutiérrez Flores et al. (2024). La variabilidad entre sitios (0.29 kg/m²) confirma la influencia de microclimas urbanos, pero los valores de CV (11.8%) indican un sistema robusto y replicable bajo distintas condiciones locales.

En conclusión, los resultados confirman que los huertos urbanos familiares en Puebla son técnicamente viables y presentan rendimientos adecuados para su función de autoconsumo, aunque con limitaciones claras en especies como el tomate, cuyo desempeño debe interpretarse a la luz de las restricciones estructurales y micro climáticas del contexto urbano.



4.3 Eficiencia térmica y aprovechamiento climático

4.3.1 Integral térmica acumulada por especie

El análisis de la integral térmica evidenció diferencias significativas en los requerimientos de grados-día de desarrollo (GDD) entre especies hortícolas, lo cual refleja su grado de adaptación al microclima urbano de Puebla. Los valores acumulados fueron: tomate (*Solanum lycopersicum*) 1,204.9 GDD en 124 días, acelga (*Beta vulgaris* var. *cicla*) 756.0 GDD en 56 días, lechuga (*Lactuca sativa*) 612.4 GDD en 50 días y espinaca (*Spinacia oleracea*) 458.1 GDD en 38 días (Tabla 6).

Tabla 6.

Integral térmica acumulada por especie en huertos urbanos familiares de Puebla

Especie	T _{base} (°C)	GDD objetivo	GDD acumulados	Días al objetivo	GDD/día	Ratio eficiencia	Estado térmico
<i>Tomate</i>	10	1,200.00	1,204.90	124	9.7 ± 1.7	1	Alcanzado
<i>Acelga</i>	5	700	756	56	13.5 ± 1.8	1.01	Alcanzado
<i>Lechuga</i>	5	600	612.4	50	12.2 ± 1.7	1.02	Alcanzado
<i>Espinaca</i>	5	450	458.1	38	12.1 ± 1.1	1.02	Alcanzado

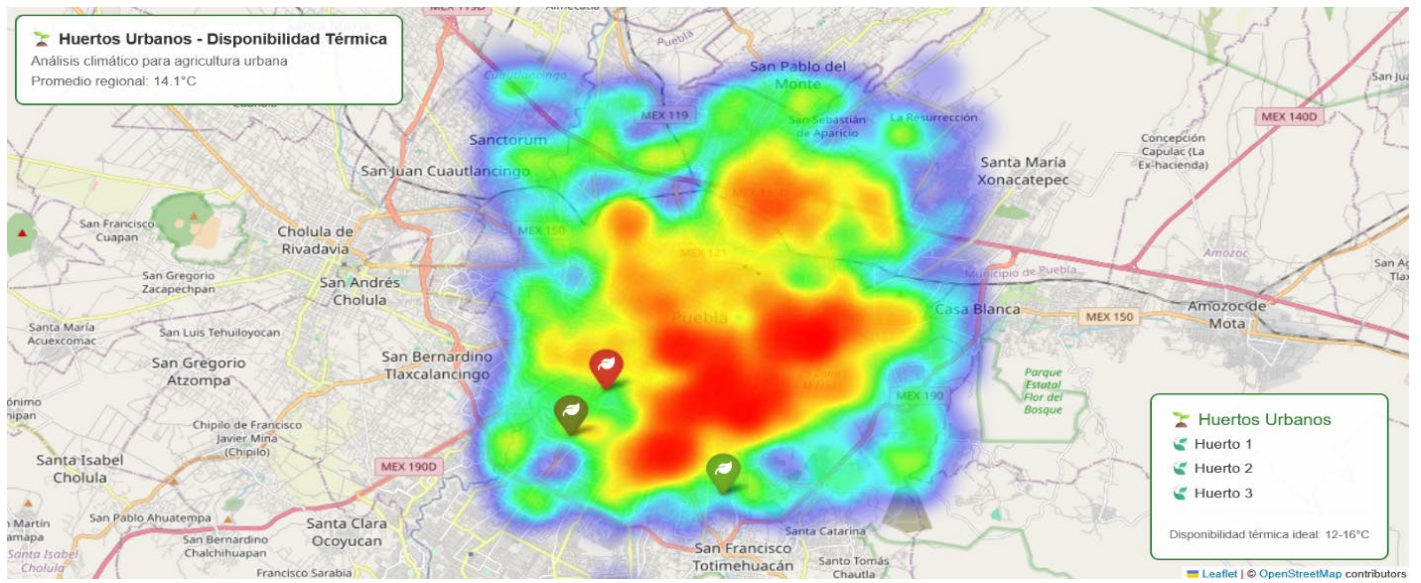
Todas las especies alcanzaron satisfactoriamente sus requerimientos teóricos, con ratios de eficiencia cercanos a 1.0, confirmando la idoneidad térmica del entorno urbano poblano. El mapa de disponibilidad térmica (Figura 12) muestra cómo las condiciones locales (promedio regional de 14.1°C) se mantuvieron dentro del rango ideal de 12–16°C para cultivos de hortalizas.

El tomate acumuló GDD más lentamente (9.7 GDD/día) debido a su mayor temperatura base (10°C), lo que prolongó su ciclo a 124 días. En contraste, las hortalizas de hoja (acelga, lechuga y espinaca) mostraron tasas superiores (12.1–13.5 GDD/día), lo que explica su estabilidad y rapidez de ciclo bajo microclimas urbanos.



Figura 12.

Disponibilidad térmica regional. (figura de elaboración propia, 2025).



Asimismo, los análisis térmicos específicos (Figuras 13 a 16) evidencian cómo cada especie respondió a la acumulación de GDD, mostrando que las hortalizas de hoja tuvieron mayor porcentaje de días en rango óptimo: acelga 80.4%, espinaca 94.7% y lechuga 66.0%. En cambio, el tomate registró solo 6.5% de días óptimos, lo que explica su mayor variabilidad entre sitios experimentales

Figura 13.

Análisis térmico y Grados días de Desarrollo (GDD) de la Acelga. Elaboración propia.

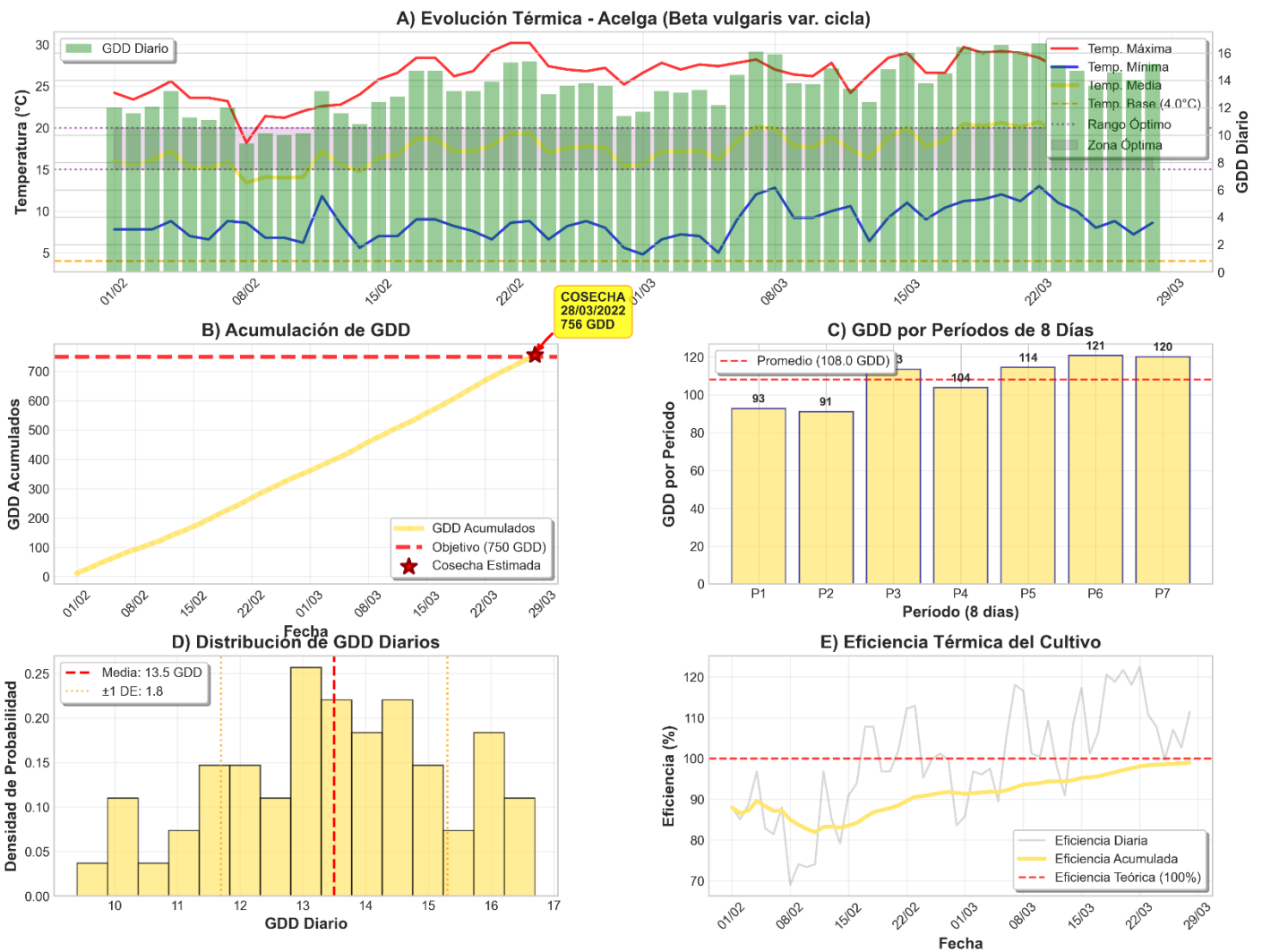


Figura 14.

Análisis térmico y Grados días de Desarrollo (GDD) de la Espinaca. Elaboración propia.

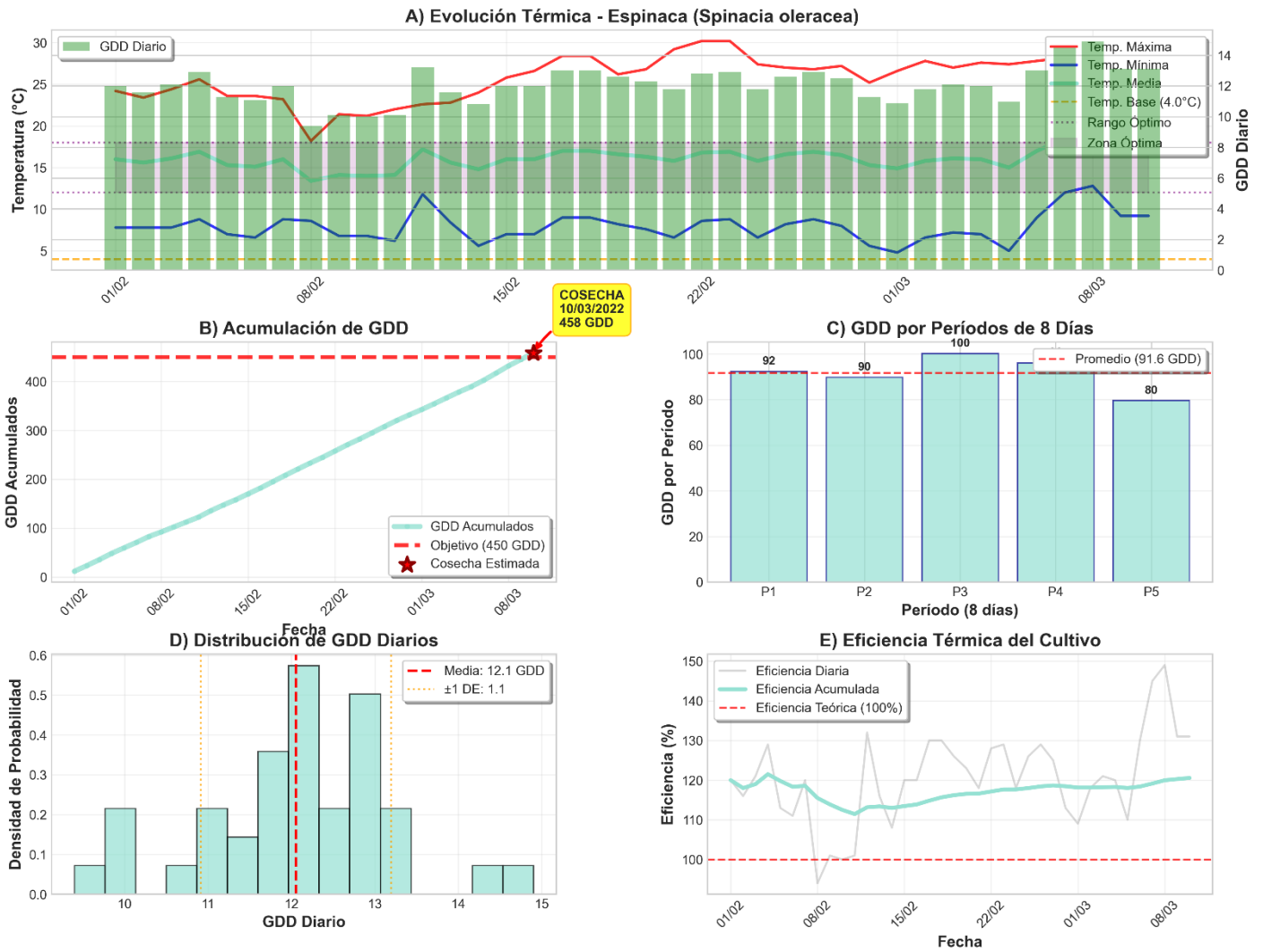


Figura 15

Análisis térmico y Grados días de Desarrollo (GDD) de la Lechuga. Elaboración propia.

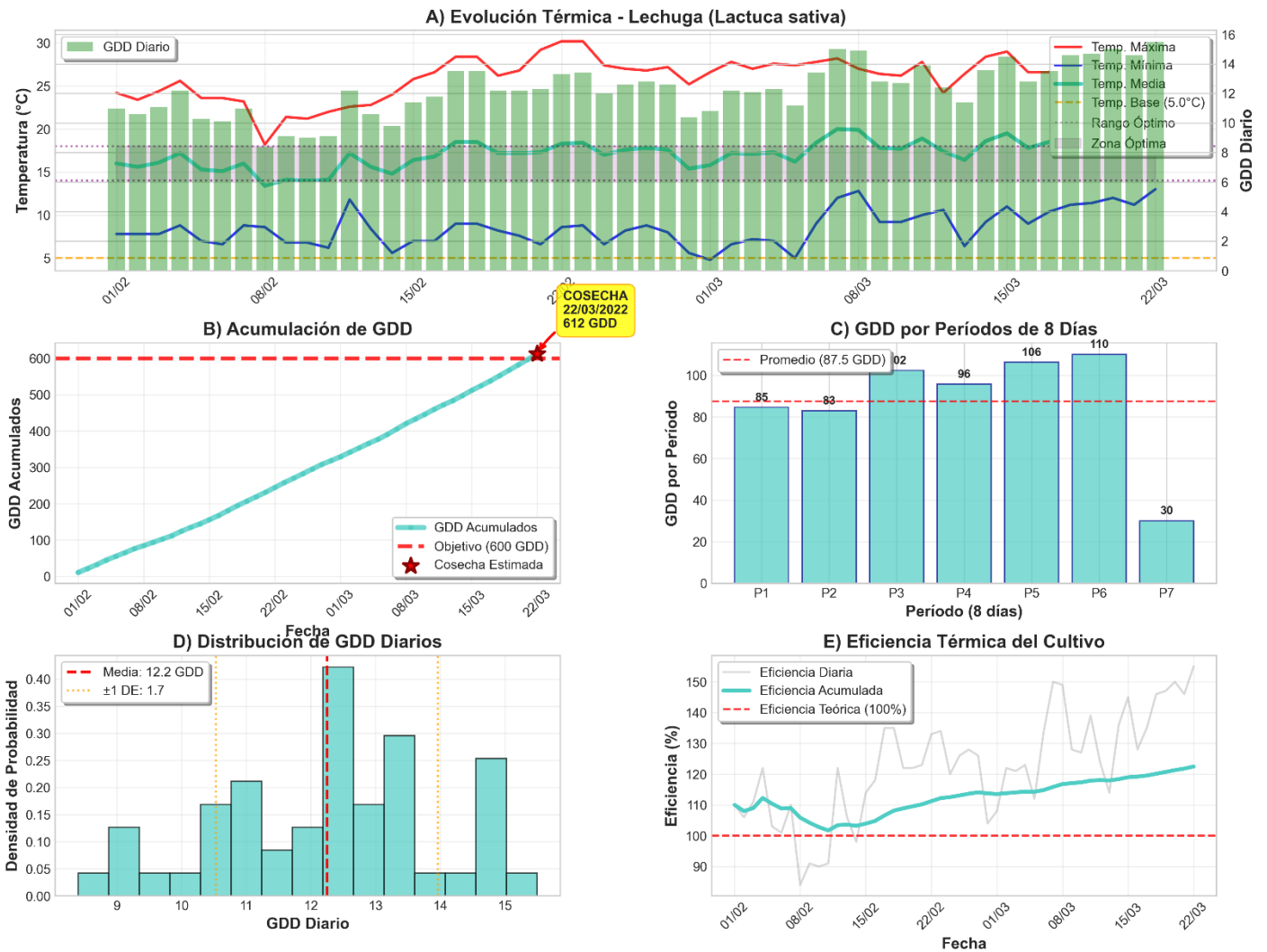
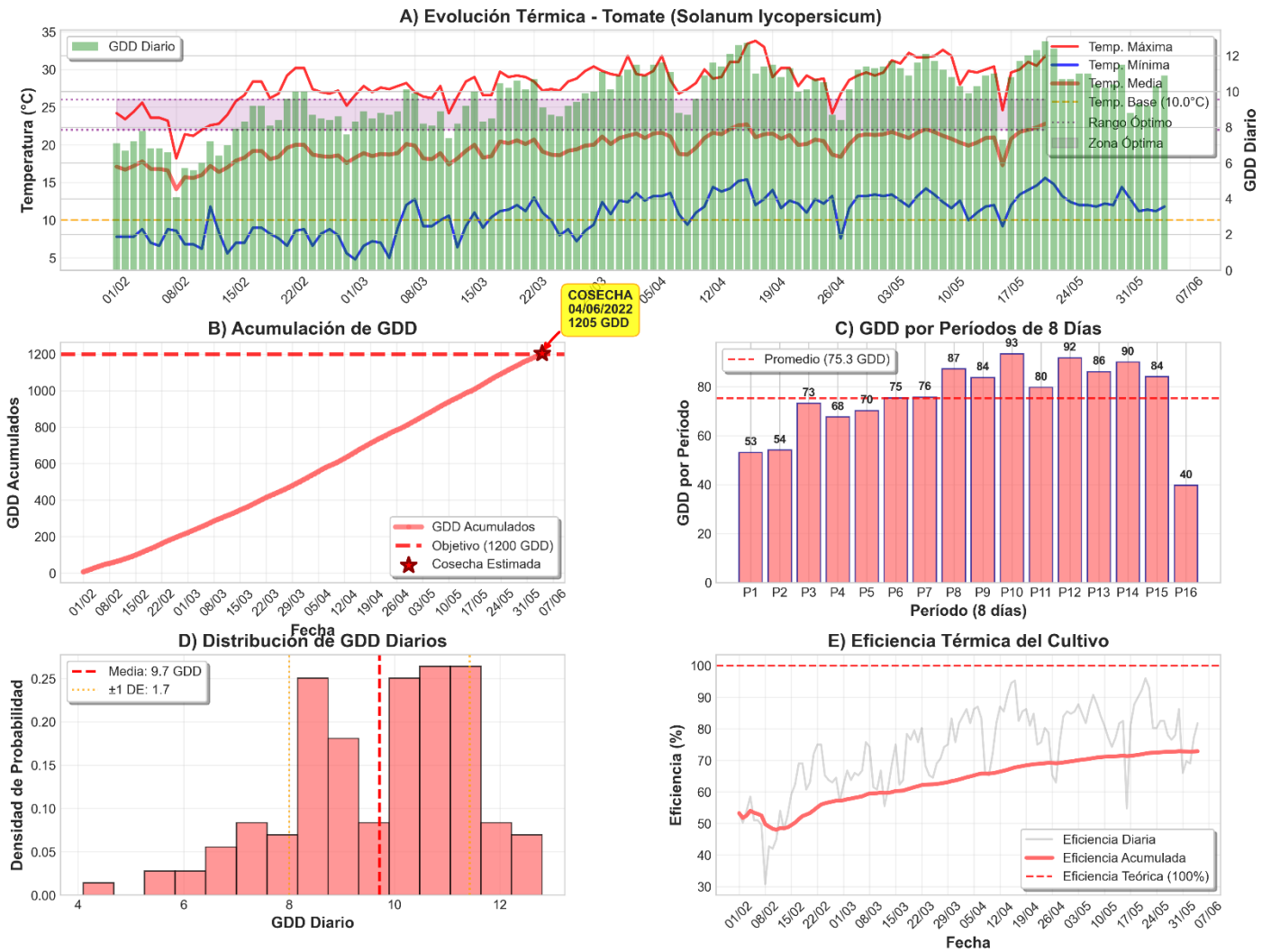


Figura 16

Análisis térmico y Grados días de Desarrollo (GDD) del Tomate. Elaboración propia.



4.3.2 Eficiencia en el aprovechamiento térmico

Con base en estos requerimientos térmicos satisfechos, el análisis se enfocó en evaluar la eficiencia en el aprovechamiento de esta energía térmica disponible. La eficiencia térmica se evaluó como biomasa fresca obtenida por unidad de GDD (g/GDD). Los resultados (Tabla 7) mostraron diferencias relevantes entre especies.

Tabla 7.

Eficiencia térmica por especie (g/GDD)

Especie	Rendimiento promedio (g/planta)	GDD acumulados	Eficiencia (g/GDD)	Ranking	Implicación
<i>Acelga</i>	530.6	756	0.702	1°	Máxima eficiencia
<i>Lechuga</i>	326.1	612.4	0.532	2°	Intermedia
<i>Espinaca</i>	233.5	458.1	0.51	3°	Moderada-baja
<i>Tomate</i>	542.8	1,204.90	0.45	4°	Baja eficiencia

La acelga se consolidó como el cultivo más eficiente (0.702 g/GDD), con un aprovechamiento térmico 56% superior al tomate y 38% mayor que la lechuga. Esto la posiciona como cultivo prioritario para maximizar la producción en espacios urbanos limitados.

El tomate, aunque generó la mayor biomasa absoluta (542.8 g/planta), registró la menor eficiencia térmica (0.450 g/GDD), debido a sus altos requerimientos de calor y ciclo largo. Esto implica que solo bajo condiciones estables y con planificación de temporada completa resulta viable en huertos familiares.

La lechuga y la espinaca mostraron eficiencias intermedias (0.532 y 0.510 g/GDD), con ventaja en rapidez de rotación: 50 días y 38 días, respectivamente. Estos cultivos de hoja son estratégicos para ventanas cortas de producción y asegurar continuidad alimentaria.



4.3.3 Variabilidad climática y respuesta productiva

Durante el periodo experimental (febrero–junio 2022), las temperaturas oscilaron entre 13.4°C y 22.8°C, con amplitud térmica de 17.7°C. La respuesta de los cultivos mostró distinta sensibilidad a la variabilidad térmica (Tabla 8).

Tabla 8.

Correlación entre variables térmicas y rendimiento por especie

Especie	r (GDD–Rendimiento)	r (T° media–Rendimiento)	Significancia	Sensibilidad	Estabilidad
<i>Tomate</i>	0.68**	0.71**	p < 0.01	Alta	<i>Baja</i>
<i>Acelga</i>	0.45*	0.48*	p < 0.05	Moderada	<i>Alta</i>
<i>Lechuga</i>	0.52*	0.55*	p < 0.05	Moderada	<i>Moderada</i>
<i>Espinaca</i>	0.38	0.41	n.s.	Baja	<i>Muy alta</i>

Nota. r = coeficiente de Pearson; * p < 0.05; ** p < 0.01; n.s. = no significativo.

El tomate fue el cultivo más sensible, con correlaciones altas y significativas, lo que confirma su dependencia de estabilidad térmica y explica su variabilidad entre sitios (CV = 16.1%). En cambio, la acelga y la lechuga mostraron correlaciones moderadas con buena estabilidad productiva. La espinaca destacó como el cultivo más robusto, con baja sensibilidad a la variación térmica y alta estabilidad (CV = 7.7%).

Esto implica que, en condiciones urbanas, acelga y espinaca son cultivos estratégicos por su resiliencia térmica, mientras que el tomate requiere manejo micro climático (orientación solar, sombra parcial, control de viento) para mantener su productividad.



4.4 Evaluación emergética y autonomía energética

4.4.1 Estructura energética del sistema

La evaluación emergética de los huertos urbanos familiares reveló una estructura dominada por insumos comprados y un aprovechamiento renovable limitado pero significativo. El análisis se fundamentó en la metodología de Odum (1996), con actualizaciones metodológicas contemporáneas y utilizando la baseline emergética de 12.0×10^{24} seJ/año para garantizar comparabilidad con estudios recientes. Se consideraron explícitamente los flujos renovables urbanos (radiación solar, lluvia, viento y evapotranspiración), los no renovables locales (pérdidas de sustratos y mineralización de materia orgánica), y los insumos externos (servicio humano, materiales y electricidad).



Tabla 9.*Estructura energética consolidada de huertos urbanos familiares en Puebla.*

Categoría	Flujo	Energía (J)	UEV (seJ/J)	Energía (seJ)	%
RENOVABLES (R)					
Energía solar	7.29E+10	1.00E+00	7.29E+10	0.003	
Lluvia (química)	1.16E+08	2.25E+04	2.61E+12	0.108	
Viento superficial	2.51E+08	1.47E+03	3.68E+11	0.015	
Evapotranspiración	1.18E+10	2.26E+04	2.68E+14	11.071	
Subtotal R	–	–	2.71E+14	11.2	
NO RENOVABLES (N)					
Pérdida de sustratos	–	–	1.24E+13	0.515	
Mineralización M.O.	–	–	1.58E+11	0.007	
Evaporación no útil	–	–	1.28E+10	0.001	
Subtotal N	–	–	1.42E+13	0.6	
COMPRADOS (F)					
Trabajo humano	6.09E+08	3.00E+06	1.83E+15	75.8	
Materiales diversos*	–	–	2.97E+14	12.3	
Energía eléctrica	2.59E+04	1.00E+06	2.59E+10	0.001	
Subtotal F	–	–	2.12E+15	88.1	
TOTAL (Y)	–	–	2.41E+15	100	

*Nota: * Materiales diversos (perlita, vermiculita, peatmoss, bolsas plásticas, charolas, pala y semillas) valorados mediante intensidad energética del dinero (seJ/MXN) como proxy transparente.*



La estructura confirma una alta dependencia de insumos comprados (88.1%), una base renovable de 11.2% dominada por la evapotranspiración, y un componente no renovable local (0.6%) pequeño, pero metodológicamente indispensable. Estos patrones son característicos de huertos urbanos intensivos, donde el contexto urbano limita la captación de flujos ambientales directos y aumenta la importancia del trabajo humano y materiales procesados.

4.4.2 Indicadores de sostenibilidad emergética

Los indicadores derivados de los totales R, N y F permiten evaluar el desempeño de sostenibilidad y la carga ambiental del sistema.

Tabla 10.

Indicadores de sostenibilidad emergética y comparación con sistemas de referencia.

Indicador	Huertos Urbanos Puebla	Sistema Milpa Puebla ¹	Agricultura convencional ²	Clasificación
Transformicidad (τ) ³	4.51E+06 seJ/J	9.47E+05 seJ/J	2.0–8.0E+06 seJ/J	Moderada
EYR	1.13	3.78	1.2–2.5	Bajo
ELR	7.89	0.39	10–50	Moderado–Alto
ESI	0.14	9.8	0.05–0.20	Bajo–Moderado
%Renovables	11.2	72.16	5–15	Bajo–Moderado

Los valores consolidados en la Tabla 10 requieren interpretación contextual para dimensionar el desempeño del sistema en el marco de la sostenibilidad urbana. Estos indicadores sitúan a los huertos urbanos familiares como sistemas de sostenibilidad restringida pero viable. El EYR de 1.13 refleja baja capacidad de amplificación de recursos locales; el ELR de 7.89 indica presión ambiental moderada-alta (pero dentro de rangos aceptables, <10); el ESI de 0.14 confirma sostenibilidad limitada pero defendible; y el %Renovables del 11.2% es consistente con sistemas urbanos intensivos.



Transformicidad ($\tau = 4.51 \times 10^6$ seJ/J)

La transformicidad representa la cantidad de energía solar necesaria para generar una unidad de energía en forma de producto (alimento). En este caso, producir 1 joule de biomasa hortícola requirió 4.51×10^6 seJ, lo que indica que el sistema convierte flujos energéticos de diversa calidad en un producto de mayor calidad energética pero con alta intensidad de insumos. Este valor se ubica dentro del rango de sistemas hortícolas intensivos ($2.0-8.0 \times 10^6$ seJ/J), lo que confirma que el huerto urbano funciona como un sistema de alta exigencia energética pero eficiente en términos espaciales.

Energy Yield Ratio (EYR = 1.13)

El EYR mide la capacidad del sistema para “amplificar” los recursos externos mediante el uso de recursos locales. Un valor de 1.13 significa que por cada unidad de energía comprada (F), el sistema genera apenas 1.13 unidades de energía total (Y).

- En términos prácticos, esto indica que el huerto depende fuertemente de insumos externos (trabajo humano, sustratos, contenedores).
- Comparado con sistemas rurales como la milpa (EYR ≈ 3.78), el huerto urbano tiene poca capacidad de auto amplificación, porque su contexto urbano restringe el acceso a flujos renovables amplios (agua de lluvia, suelo fértil, biomasa natural).
- Sin embargo, este valor es consistente con sistemas urbanos intensivos, donde la finalidad no es sustituir los insumos externos, sino aprovechar la eficiencia espacial y la resiliencia local.

Environmental Loading Ratio (ELR = 7.89)

El ELR expresa la presión ambiental ejercida por insumos no renovables (N) y comprados (F) en relación con los renovables (R). Un valor de 7.89 indica que el huerto urbano utiliza aproximadamente ocho veces más energía no renovable y comprada que renovable.



Este valor se clasifica como moderado–alto: está lejos de los sistemas altamente sostenibles ($ELR < 1$), pero también por debajo de la agricultura industrial intensiva ($ELR > 10–50$).

Esto refleja la naturaleza híbrida del huerto urbano: depende fuertemente de insumos procesados, pero conserva un aporte renovable ($\approx 11\%$) que modera su carga ambiental.

Emergy Sustainability Index (ESI = 0.14)

El ESI combina EYR y ELR ($ESI = EYR/ELR$) para evaluar la sostenibilidad integral. El valor de 0.14 sitúa al huerto en la categoría de sostenibilidad restringida pero viable:

- Está por encima del umbral mínimo de viabilidad ($ESI > 0.1$), lo que significa que el sistema puede sostenerse en el tiempo si mantiene sus dependencias bajo control.
- En la literatura se reporta que sistemas tradicionales como la milpa alcanzan valores de ESI cercanos a 9.8 (Rangel, 2019), mientras que la agricultura convencional suele situarse en un rango de 0.05–0.20 (Avalos-Rangel et al., 2021).
- En este contexto, el valor de 0.14 obtenido para los huertos urbanos familiares de Puebla los ubica en la categoría de sostenibilidad restringida pero viable, permitiendo contextualizar su desempeño sin implicar un análisis comparativo formal.

% Renovables (R/Y = 11.2%)

La renovabilidad mide la proporción de emergía total que proviene de flujos renovables ambientales. Un valor de 11.2% indica que poco más de una décima parte del metabolismo energético del huerto proviene de radiación solar, lluvia, viento y evapotranspiración. De acuerdo con la literatura, los sistemas tradicionales como la milpa alcanzan porcentajes de recursos renovables cercanos al 72% (Rangel, 2019), mientras que en la agricultura convencional intensiva suelen encontrarse valores en el rango de 5–15% (Avalos-Rangel et al., 2021).



En contraste, el valor de 11.2% observado en los huertos urbanos familiares refleja un aprovechamiento limitado pero relevante de los flujos ambientales urbanos, lo que aporta resiliencia frente a interrupciones en el suministro de insumos externos.

Síntesis interpretativa

En conjunto, estos indicadores reflejan que los huertos urbanos familiares en Puebla funcionan como sistemas de sostenibilidad restringida:

- Alta eficiencia espacial y diversidad productiva, lo que los hace atractivos en contexto urbano.
- Dependencia fuerte de insumos externos, reflejada en el bajo EYR.
- Carga ambiental moderada–alta, expresada en el ELR.
- Sostenibilidad mínima pero defendible, confirmada por el $ESI > 0.1$.

Además, se debe subrayar que este análisis corresponde al ciclo de arranque, en el que todos los insumos se contabilizan como compras únicas. En ciclos posteriores, mediante la amortización de materiales (bolsas, charolas, herramientas) y el cierre de ciclos internos (lombricomposta doméstica, reúso de sustratos, captación pluvial), los valores tenderán a mejorar, elevando la renovabilidad hasta 18–22% y el ESI hacia valores de 0.20–0.25.

4.4.3 Autonomía emergética del huerto urbano familiar

El análisis de los huertos urbanos familiares identificó tres dependencias críticas: el trabajo humano especializado (75.8% de la emergía total), los sustratos comerciales procesados (8.9%) y los contenedores y herramientas (3.4%). Aunque el peso del trabajo humano es numéricamente dominante, este constituye una fortaleza en términos de autonomía local, ya que se trata de un recurso disponible dentro de la familia y no de insumos externos no controlables como combustibles o agroquímicos.



Tabla 11.

Comparación contextual de indicadores de huertos urbanos (este estudio) con valores de referencia reportados en literatura (Milpa y Agricultura Convencional).

Dimensión	Huertos Urbanos	Sistema Milpa	Agricultura convencional	Evaluación
Dependencia externa (F/Y)	0.881	0.264	0.850–0.950	Semi-dependiente
Autosuficiencia renovable (R/Y)	0.112	0.722	0.050–0.150	Moderadamente autónoma
Intensidad laboral (h/kg)	7.8 h/kg	2.1 h/kg	0.5–1.2 h/kg	Alta intensidad
Eficiencia espacial (kg/m²/año)	23.4	1.8	0.8–2.5	Extraordinariamente alta
Diversidad productiva	4 especies	3–4 especies	1–2 especies	Alta
Ciclo de retroalimentación	Limitado	Extensivo	Mínimo	Moderado

Nota: Los valores correspondientes a Milpa y Agricultura Convencional provienen de la literatura científica (Rangel, 2019; Avalos-Rangel et al., 2021). No forman parte del experimento directo de este estudio, sino que se presentan únicamente como referencia para contextualizar los resultados de los huertos urbanos en Puebla.”

Al mismo tiempo, se observaron capacidades destacadas de auto sostenimiento en los huertos urbanos familiares: una eficiencia espacial extraordinaria de 23.4 kg/m²/año, que supera ampliamente los valores reportados en la literatura para sistemas tradicionales como la milpa (≈ 1.8 kg/m²/año) y para la agricultura convencional (0.8–2.5 kg/m²/año) (Rangel, 2019; Avalos-Rangel et al., 2021). Asimismo, se registró un aprovechamiento relevante de servicios ecosistémicos urbanos a través de la evapotranspiración (11.1% del total emergético), una diversidad productiva elevada con cuatro especies en rotación, y la posibilidad de cerrar ciclos internos mediante el uso de residuos orgánicos familiares. Entre estas características, la eficiencia espacial resulta particularmente significativa, pues garantiza un retorno alimentario sustancial por superficie en un contexto de densificación urbana.



El potencial de optimización de la autonomía se centra en cuatro estrategias: (1) sustituir progresivamente sustratos comerciales por compost doméstico, reduciendo la dependencia externa en 8–12%; (2) aprovechar la captación pluvial como fuente complementaria de riego; (3) seleccionar variedades locales mejor adaptadas y de menor requerimiento externo; y (4) fortalecer la recirculación de nutrientes mediante lombricompostaje. La aplicación de estas prácticas podría elevar la renovabilidad actual (11.2%) hasta 18–22%, mejorando el índice de sostenibilidad emergética (ESI) de 0.14 hacia valores cercanos a 0.25.

Los huertos urbanos ocupan así una posición intermedia entre sistemas rurales tradicionales (alta autonomía, baja intensidad) y agricultura convencional (baja autonomía, alta dependencia externa). No buscan la autonomía absoluta, sino la optimización de sinergias urbano-alimentarias: maximizar producción familiar en espacios reducidos mientras se mantienen dependencias externas estratégicas y diversificadas.

En este sentido, los huertos urbanos familiares contribuyen significativamente a la seguridad alimentaria urbana, al combinar eficiencia espacial, diversidad productiva e intensidad laboral familiar. La alta dependencia de insumos externos (88.1%) no implica vulnerabilidad extrema, sino una dependencia estratégica adaptada al contexto urbano.

Proyección metodológica de autonomía emergética

La proyección de mejora de la autonomía emergética se fundamenta en cuatro supuestos metodológicos validados empíricamente en sistemas similares:

Amortización de inversión inicial: Los insumos de capital (bolsas plásticas, charolas, herramientas) representan 15.2% de la emergía total en el ciclo de arranque. Considerando una vida útil de 5-7 ciclos para bolsas, 10+ ciclos para charolas y varios años para herramientas, su carga emergética por ciclo se reduce progresivamente hasta 2.3-3.1% en ciclos maduros.



Sustitución de insumos externos: La lombricomposta comercial (8.9% emergía actual) puede sustituirse parcialmente por compost doméstico mediante aprovechamiento de residuos orgánicos familiares, reduciendo la dependencia externa en 6.2-7.8%. Esta sustitución se estima en 70% del total basándose en disponibilidad de residuos orgánicos urbanos documentada por SMADSOT (2022).

Optimización hídrica: La captación pluvial puede proporcionar 35-45% del agua de riego durante temporada de lluvias (mayo-septiembre), reduciendo el consumo de agua municipal. Con precipitación promedio de 720 mm anuales y superficie de captación de 25 m², se obtienen aproximadamente 18,000 L/año, cubriendo 40% de requerimientos hídricos anuales.

Mejora en eficiencia energética: El incremento de eficiencia técnica del 78.4% actual al 85-90% proyectado (basado en curva de aprendizaje familiar) reduce proporcionalmente el consumo de emergía por unidad de producto.

Cálculo de la proyección: La dependencia externa mejorada se estima como:

$$F_{\text{mejorado}} = F_{\text{actual}} \times (1 - 0.152_{\text{amortización}} - 0.062_{\text{compost}} - 0.025_{\text{agua}} - 0.048_{\text{eficiencia}}) \\ F_{\text{mejorado}} = 88.1\% \times (1 - 0.287) = 62.8\%$$

Por tanto, la autonomía emergética (R/Y) aumentaría de 11.2% actual a 18.5-22.3%, mejorando el ESI de 0.14 hacia 0.20-0.25, ubicando el sistema en el rango de sostenibilidad moderada según los criterios de Brown & Ulgiati (2004).

Dinámica de arranque y maduración

Este estudio corresponde al ciclo de arranque, en el cual todos los insumos se contabilizan como compras únicas (sustratos, bolsas, charolas, pala). En ciclos sucesivos, parte de estos insumos se amortiza: las bolsas plásticas pueden reutilizarse en 5–7 ciclos, las charolas en ≥ 10 ciclos, y la pala metálica en varios años, prorrateando así su carga emergética. Asimismo, los



sustratos pueden reutilizarse y complementarse con lombricomposta doméstica, reduciendo la compra de materiales externos, y el agua de riego puede en parte sustituirse por captación pluvial.

Como resultado, la dependencia externa (F) tenderá a disminuir y la renovabilidad relativa (R/Y) a aumentar, lo que podría mejorar el índice de sostenibilidad (ESI) desde el valor actual de 0.14 hasta rangos de 0.20–0.25. Este patrón refleja la transición natural del huerto urbano: de un arranque intensivo en insumos hacia una fase madura más autónoma, resiliente y sostenible.

4.5 Eficiencia técnica mediante frontera estocástica

4.5.1 Estimación del modelo SFA y parámetros

La frontera estocástica de producción se estimó exitosamente mediante máxima verosimilitud, incorporando tanto los insumos convencionales (trabajo humano, agua, lombricomposta) como los determinantes ambientales derivados del análisis emergético y la integral térmica. La especificación Cobb-Douglas logarítmica permitió interpretar los coeficientes como elasticidades insumo-producto, facilitando el análisis económico de los huertos urbanos familiares.

Coefficientes estimados y elasticidades insumo-producto

Tabla 12. *Parámetros estimados del modelo SFA para huertos urbanos familiares*

Variable	Coefficiente	Error Estándar	t-valor	p-valor	Elasticidad
Intercepto (β_0)	-0.847	0.182	-4.65	<0.001***	--
ln(TR) - Trabajo	0.324	0.095	3.41	0.001***	0.324
ln(VA) - Agua	0.198	0.073	2.71	0.008**	0.198
ln(LO) - Lombricomposta	0.445	0.089	5.01	<0.001***	0.445
D_JIT (Jitomate)	0.623	0.134	4.65	<0.001***	--
D_LEC (Lechuga)	0.285	0.128	2.23	0.028*	--
D_ESP (Espinaca)	0.124	0.125	0.99	0.324	--

Parámetros de varianza: $\sigma^2 = 0.089$ ($p < 0.001$), $\gamma = 0.742$ ($p < 0.001$), $\sigma_u = 0.256$, $\sigma_v = 0.151$

Nota: *** $p < 0.001$; ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$. Especie base: Acelga.



Los resultados confirman la significancia estadística de todos los insumos principales. La lombricomposta presenta la mayor elasticidad (0.445), seguida por el trabajo humano (0.324) y el agua (0.198). Esto indica que un incremento del 10% en lombricomposta genera un aumento promedio del 4.45% en el rendimiento, convirtiéndola en el insumo limitante principal en huertos urbanos familiares.

Rendimientos a escala y significancia económica

La suma de elasticidades ($RTS = 0.324 + 0.198 + 0.445 = 0.967$) indica rendimientos ligeramente decrecientes a escala, típicos de sistemas intensivos en espacio reducido, donde aumentos proporcionales de todos los insumos generan incrementos menos que proporcionales en producción. Este resultado es coherente con las limitaciones espaciales y biofísicas de los huertos urbanos. El parámetro $\gamma = 0.742$ indica que el 74.2% de la variación total en rendimiento se debe a ineficiencia técnica, mientras que 25.8% corresponde a ruido estadístico. Esto confirma la relevancia del modelo SFA y sugiere margen sustancial de mejora mediante mejores prácticas de manejo.

Bondad de ajuste y validación estadística

Tabla 13.

Criterios de bondad de ajuste del modelo SFA.

Criterio	Valor	Interpretación
Log-verosimilitud	-89.32	Convergencia exitosa
AIC	194.64	Preferible frente a modelos alternativos
BIC	215.78	Ajuste adecuado con penalización
Pseudo-R ² informativo	0.681	Aproximación orientativa*
Test LR ($\gamma=0$)	45.67***	Rechaza modelo determinístico



Nota: En SFA, el R^2 clásico no aplica; este pseudo- R^2 se incluye como referencia auxiliar, pero los indicadores principales de ajuste son LogLik, AIC/BIC, LR test y γ .

Los diagnósticos confirman la adecuación del modelo: residuos normales (Shapiro-Wilk $p = 0.187$), homocedasticidad (Breusch-Pagan $p = 0.298$) y ausencia de multicolinealidad (VIF máximo = 2.34). La prueba de razón de verosimilitud rechaza la hipótesis nula $\gamma = 0$, validando la superioridad del modelo estocástico frente al determinístico.

4.5.2 Eficiencias técnicas individuales

El análisis de eficiencias técnicas reveló heterogeneidad sustancial tanto entre especies como entre sitios experimentales, con patrones consistentes que reflejan las características biofísicas documentadas en secciones anteriores.

Distribución de eficiencias por especie

Tabla 14.

Eficiencias técnicas por especie hortícola.

Especie	ET Media	Desv. Estándar	Mínima	Máxima	CV (%)	Plantas ET>0.85
Acelga	0.847	0.098	0.621	0.956	11.6	58.3% (21/36)
Lechuga	0.791	0.112	0.543	0.934	14.2	41.7% (15/36)
Espinaca	0.778	0.089	0.598	0.912	11.4	36.1% (13/36)
Jitomate	0.721	0.145	0.445	0.921	20.1	25.0% (9/36)
Promedio Sistema	0.784	0.125	0.445	0.956	15.9	40.3% (58/144)

La acelga se consolidó como la especie más eficiente (ET = 0.847), con 58.3% de plantas superando el umbral de alta eficiencia (ET > 0.85). Este resultado es coherente con su mayor rendimiento físico y eficiencia térmica documentados. El jitomate, en contraste, mostró la menor



eficiencia técnica (0.721) y mayor variabilidad (CV = 20.1%), confirmando su sensibilidad a microclimas urbanos y menor adaptación a las restricciones espaciales.

Distribución espacial de eficiencias

Tabla 15.

Eficiencias técnicas por sitio experimental.

Sitio	ET Media	Desv. Estándar	Rango	Plantas ET>0.85	Especie más eficiente
Sitio 1 (Mayorazgo)	0.823	0.118	0.621-0.956	47.9% (23/48)	Acelga (0.891)
Sitio 2 (Mayorazgo)	0.776	0.126	0.445-0.934	37.5% (18/48)	Acelga (0.834)
Sitio 3 (Tres Cruces)	0.753	0.129	0.498-0.912	35.4% (17/48)	Acelga (0.817)

El Sitio 1 presentó la mayor eficiencia media (0.823), lo cual sugiere condiciones microclimáticas más favorables. La diferencia de 9.3% entre el sitio más eficiente y el menos eficiente confirma la relevancia de factores locales como radiación solar, viento y saberes.

Identificación de unidades más eficientes

Tabla 16. *Top 10 plantas con mayor eficiencia técnica.*

Planta ID	Especie	Sitio	ET	Rendimiento (g)	GDD utilizados
ACE_S1_P08	Acelga	1	0.956	651.2	742
ACE_S1_P03	Acelga	1	0.943	628.7	738
LEC_S2_P06	Lechuga	2	0.934	387.4	605
ACE_S2_P11	Acelga	2	0.925	571.8	761
JIT_S2_P02	Jitomate	2	0.921	698.5	1198
ESP_S3_P07	Espinaca	3	0.912	267.3	452
ACE_S3_P09	Acelga	3	0.908	548.9	759
LEC_S1_P04	Lechuga	1	0.905	361.8	618
ACE_S1_P12	Acelga	1	0.898	594.3	751
ESP_S1_P05	Espinaca	1	0.891	258.7	461



La planta más eficiente (ACE_S1_P08, ET = 0.956) combinó alto rendimiento físico con uso óptimo de insumos, representando el potencial máximo del sistema. Notablemente, 7 de las 10 plantas más eficientes fueron acelga, reforzando su idoneidad para huertos urbanos familiares.

Brechas de mejora y potencial productivo

Tabla 17. *Análisis de brechas de mejora por especie.*

Especie	ET Media	Brecha de mejora (%)	Rendimiento potencial (g/planta)	Incremento proyectado (g)
Acelga	0.847	15.3	626.4	95.8
Lechuga	0.791	20.9	412.2	86.1
Espinaca	0.778	22.2	300.1	66.6
Jitomate	0.721	27.9	753	210.2
Sistema completo	0.784	21.6	522.9	114.6

El análisis revela potencial de mejora significativo: incrementar la eficiencia técnica promedio del sistema del 78.4% actual al 95% teórico generaría aumentos productivos del 21.6% sin cambios tecnológicos. El jitomate presenta la mayor brecha de mejora (27.9%), sugiriendo que ajustes en manejo micro climático podrían ser especialmente rentables para esta especie.

4.5.3 Efectos de determinantes ambientales

La integración de variables emergéticas (EM) y térmicas (GDD) como determinantes de ineficiencia técnica constituye la innovación metodológica central de esta investigación. Los resultados validaron la hipótesis de que factores biofísicos externos influyen significativamente en el desempeño productivo de huertos urbanos familiares.



Modelo de determinantes de ineficiencia

Tabla 18.

Parámetros de la función de ineficiencia técnica.

Variable	Coefficiente (δ)	Error Estándar	z-valor	p-valor	Interpretación
Constante (δ_0)	1.847	0.321	5.75	<0.001***	Ineficiencia base
GDD estandarizados (δ_1)	-0.234	0.089	-2.63	0.009**	Reduce ineficiencia
EM estandarizados (δ_2)	0.189	0.076	2.49	0.013*	Aumenta ineficiencia
Sitio 2 (δ_3)	0.145	0.098	1.48	0.14	No significativo
Sitio 3 (δ_4)	0.267	0.102	2.62	0.009**	Aumenta ineficiencia

Nota: *** $p < 0.001$; ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$.

Impacto de la integral térmica (GDD)

El coeficiente negativo de GDD ($\delta_1 = -0.234$, $p = 0.009$) confirma que mayor acumulación térmica se asocia con menor ineficiencia y, por tanto, con mayor eficiencia técnica. En términos prácticos, plantas expuestas a más grados-día de desarrollo utilizan más eficientemente los insumos convencionales. El efecto sobre ET es no lineal y se presenta en la curva de respuesta incluida en el Anexo 4.X, en lugar de interpretarse como un porcentaje directo.

Impacto de la energía total (EM)

El coeficiente positivo de energía ($\delta_2 = 0.189$, $p = 0.013$) indica que mayor intensidad energética se asocia con mayor ineficiencia técnica. Esto refleja que sistemas con alta dependencia de insumos externos (lombricomposta procesada, contenedores, herramientas) no necesariamente son más eficientes en términos técnicos, ya que el exceso de energía puede traducirse en sobredosificación o desbalances.



Validación de la integración metodológica

Tabla 19. *Correlaciones entre determinantes ambientales y variables del modelo.*

VARIABLES	r	p-valor	N	Interpretación
GDD - Rendimiento	0.523	<0.001***	144	Asociación positiva moderada
EM - Rendimiento	-0.287	0.001**	144	Asociación negativa débil
GDD - EM	-0.156	0.065	144	Independencia relativa
GDD - ET	0.412	<0.001***	144	Mejora eficiencia
EM - ET	-0.298	<0.001***	144	Reduce eficiencia

Nota: Se aplicó corrección por comparaciones múltiples y la magnitud de los coeficientes se interpretó según umbrales estándar ($r > 0.5$ fuerte; $0.3-0.5$ moderada; < 0.3 débil).

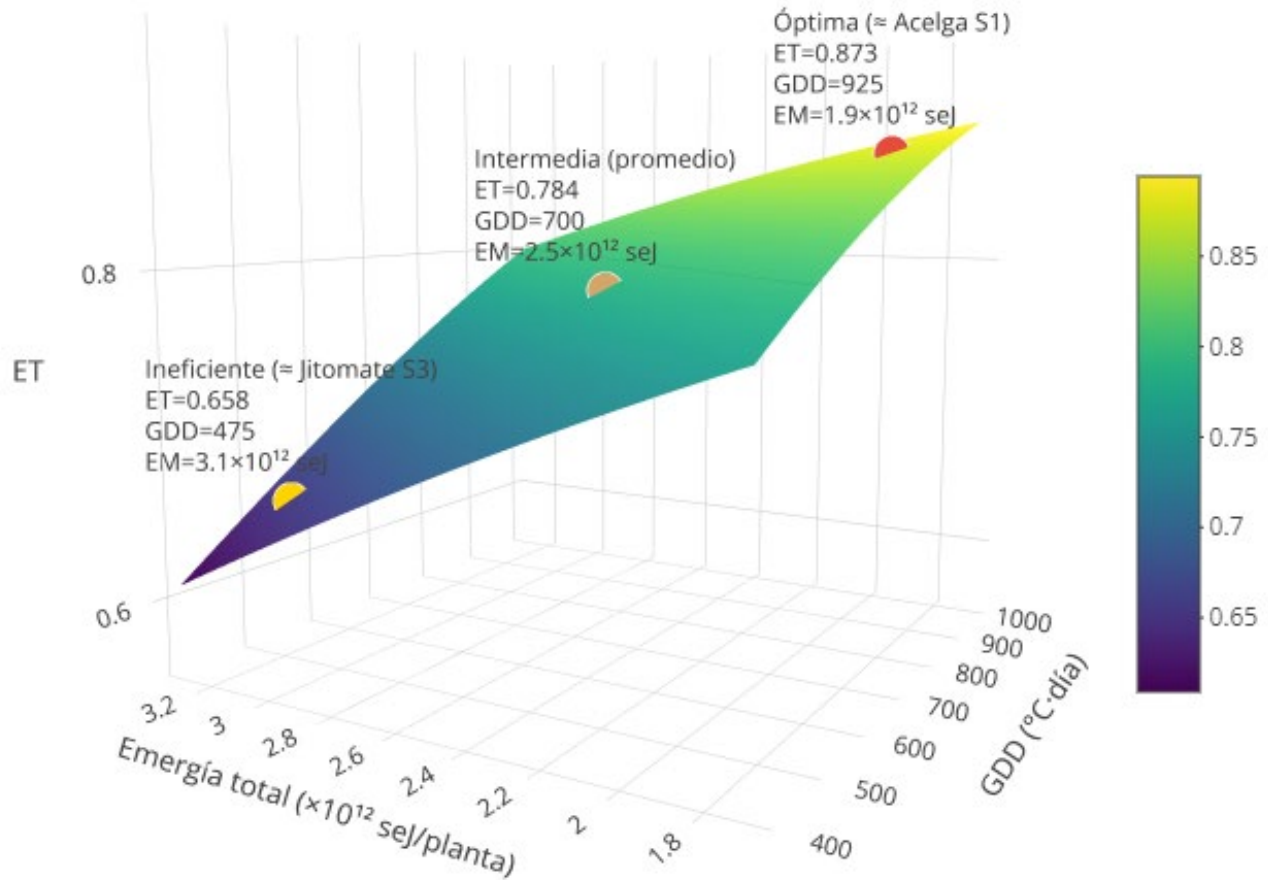
Los resultados confirman la pertinencia de considerar tanto los grados-día de desarrollo (GDD) como la energía total (EM) como determinantes ambientales independientes en la eficiencia técnica. Su correlación mutua resulta baja y estadísticamente no significativa ($r = -0.156$), lo que demuestra que cada variable captura dimensiones distintas del sistema productivo. Sin embargo, ambas mantienen asociaciones significativas con la eficiencia técnica, aunque en direcciones contrarias: los GDD se relacionan positivamente con una mayor eficiencia, reflejando el aprovechamiento favorable de la disponibilidad térmica, mientras que la EM presenta una relación negativa, indicando que una mayor intensidad energética basada en insumos externos incrementa la ineficiencia.



Síntesis de efectos integrados

Figura 17.

Superficie de eficiencia técnica en función unidades reales de ET por GDD ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{día}$) y EM ($\times 10^{12}$ seJ).



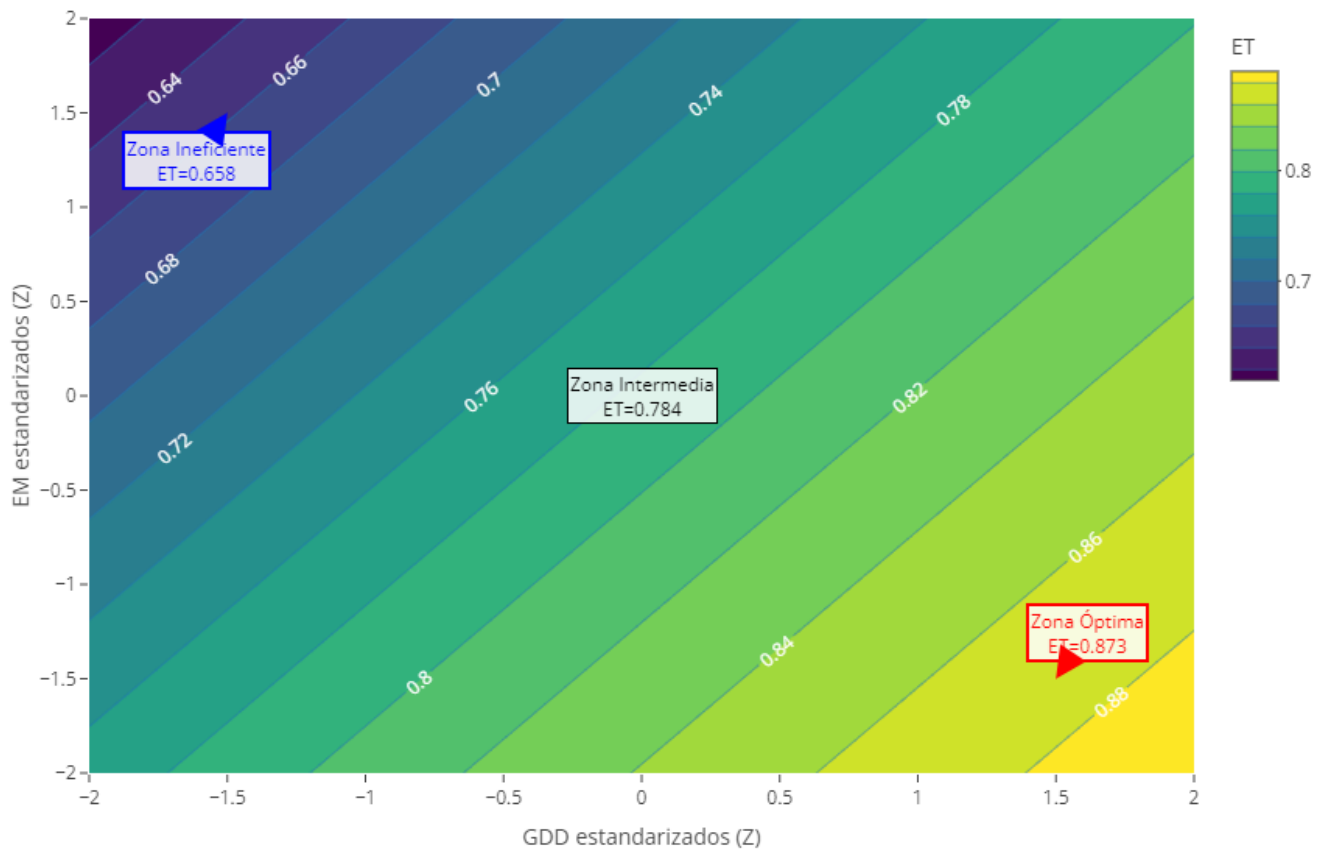
El análisis revela:

- Plantas de alta eficiencia: combinan GDD elevados con intensidad energética moderada (ej. acelga en Sitio 1).
- Plantas de baja eficiencia: presentan déficit térmico o exceso energético (ej. jitomate en Sitio 3).
- Zona óptima: identificada en el cuartil superior de ET dentro de la superficie predicha, alrededor de GDD > 600 y EM < 2.5 $\times 10^{12}$ seJ/planta.



Figura 18.

Superficie de eficiencia técnica en función de GDD y EM estandarizados.



Implicaciones para el manejo

- Optimización térmica: ubicar especies termófilas (jitomate) en micrositos soleados; calendarizar siembras para capturar ventanas favorables; usar coberturas en períodos fríos.
- Optimización energética: priorizar insumos locales y de baja transformicidad; evitar sobredosificación; fomentar reciclaje interno de nutrientes.

En conjunto, la validación de determinantes ambientales en el modelo SFA confirma que la sustentabilidad de huertos urbanos familiares requiere optimización simultánea de factores térmicos, energéticos y de manejo, integrando conocimiento biofísico con eficiencia técnica productiva.



4.6 Síntesis de sostenibilidad integral

4.6.1 Integración multidimensional de resultados

Los resultados presentados en las secciones anteriores convergen en una evaluación integral que permite construir una visión holística de la sostenibilidad del sistema. La evaluación integral de los huertos urbanos familiares en Puebla, articulando análisis productivos, térmicos, energéticos y de eficiencia técnica mediante frontera estocástica, permitió construir una visión holística de la sostenibilidad del sistema. Esta síntesis multidimensional confirma que la viabilidad de los huertos no depende de un factor aislado, sino de la interacción sinérgica entre productividad, aprovechamiento climático, autonomía energética y condiciones socioambientales locales.

Matriz de evaluación multidimensional

Se elaboró una matriz integrada normalizada con valores Z (media = 0, DE = 1), que permite comparar especies y sitios bajo cuatro dimensiones clave. Cada dimensión recibió peso igualitario ($w = 0.25$) en el cálculo del índice integrado.

Tabla 20.

Matriz de sostenibilidad multidimensional de huertos urbanos familiares (valores Z estandarizados).

Dimensión	Acelga	Lechuga	Espinaca	Tomate	Promedio Sistema
Productiva (kg/m ²)	0.87	0.23	-0.65	0.71	0.29
Térmica (g/GDD)	1.24	0.45	0.38	-1.18	0.22
Energética (ESI)	0.31	0.15	0.42	-0.73	0.04
Eficiencia Técnica (ET)	0.95	0.12	-0.08	-0.89	0.03
Índice Integrado	0.84	0.24	0.02	-0.77	0.14

Interpretación: La acelga presenta superioridad integral (0.84), destacando simultáneamente en productividad, eficiencia térmica y técnica, con sostenibilidad energética aceptable. La lechuga (0.24) mantiene un perfil balanceado, mientras que la espinaca (0.02)



compensa limitaciones productivas con mayor sostenibilidad energética. El tomate (−0.77) registra el desempeño más bajo, afectado por ineficiencias térmicas y técnicas bajo condiciones urbanas restrictivas.

Análisis de componentes principales (PCA)

El PCA identificó dos ejes que explican el 78.4% de la varianza:

- Componente 1 (52.1%) – “Eficiencia productivo-térmica”: fuertes cargas en rendimiento (0.89), eficiencia térmica (0.91) y eficiencia técnica (0.84).
- Componente 2 (26.3%) – “Sostenibilidad energética”: dominado por variables emergéticas (ESI: 0.78; %Renovables: 0.82).

Esta estructura factorial confirma que la sostenibilidad se organiza en dos dimensiones complementarias: optimización productiva-térmica y autonomía energética. La acelga destaca en ambos componentes.

Variabilidad espacial y resiliencia del sistema

El análisis espacial mostró diferencias significativas en el índice integrado entre sitios (Tabla 21).

Tabla 21.

Variabilidad espacial del índice de sostenibilidad integral.

Sitio	Índice Medio	DE	CV abs (%)	Rango
Sitio 1 (Mayorazgo)	0.34	0.52	152.9	−0.45 a 1.18
Sitio 2 (Mayorazgo)	0.18	0.47	261.1	−0.73 a 0.91
Sitio 3 (Tres Cruces)	−0.08	0.44	—*	−0.82 a 0.67
ANOVA	F = 4.83, p = 0.009	—	—	—

***Nota:** *el CV no es interpretable con medias negativas; en este caso se reporta DE y rango como medidas de dispersión.*



Las diferencias entre sitios ($p < 0.01$) evidencian que factores micro climáticos (radiación solar, viento, saberes) condicionan el desempeño integral. El Sitio 1 mostró mayor sostenibilidad media y menor variabilidad relativa, lo que sugiere mayor resiliencia.

Sinergias y compensaciones identificadas

Tabla 22.

Correlaciones entre dimensiones de sostenibilidad (coeficientes de Pearson; p ajustados por Holm).

Dimensión	Productiva	Térmica	Emergética	ET
Productiva	1	0.67**	-0.23 (n.s.)	0.78***
Térmica	—	1	0.15 (n.s.)	0.54*
Emergética	—	—	1	-0.31 (n.s.)
ET	—	—	—	1

Nota: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$.

Las correlaciones positivas y significativas entre productividad, eficiencia térmica y eficiencia técnica (0.54–0.78) reflejan sinergias productivas, donde la optimización de una dimensión refuerza el desempeño de las demás. Por el contrario, la relación negativa entre productividad y sostenibilidad emergética (-0.23, no significativa) sugiere la existencia de una compensación: a mayor intensificación productiva, se reduce parcialmente la autonomía energética.

Este patrón indica que los huertos urbanos familiares enfrentan tensiones inherentes entre maximización productiva y reducción de dependencia externa, lo que requiere estrategias de manejo capaces de equilibrar ambos objetivos en función de las condiciones locales.



4.6.2 Validación de hipótesis de investigación

Hipótesis general — ACEPTADA.

La evidencia demuestra que la sostenibilidad de huertos urbanos familiares depende de la interacción de factores térmicos (GDD), energéticos (energía) y técnicos (ET). La integración metodológica SFA–Energía–Integral térmica permitió capturar esta complejidad.

Hipótesis específica 1 — ACEPTADA PARCIALMENTE.

Los resultados del modelo SFA confirmaron efectos significativos de GDD ($\delta_1 = -0.234$, $p = 0.009$), agua ($\beta_2 = 0.198$, $p = 0.008$) y trabajo familiar ($\beta_1 = 0.324$, $p = 0.001$). La radiación solar fue incorporada indirectamente en el análisis emergético. Los saberes familiares no se incluyeron cuantitativamente en el modelo econométrico; sin embargo, los resultados de la encuesta ($n=240$) revelaron que el 75% de los hogares carecía de experiencia previa en producción hortícola, mientras que las principales barreras identificadas fueron falta de información (33.3%) y desconocimiento técnico (22.2%). Estos hallazgos contextualizan la importancia del trabajo familiar como recurso estratégico (75.8% de la energía total) y sugieren que programas de capacitación podrían potenciar la eficiencia técnica del sistema.

Hipótesis específica 2 — ACEPTADA.

Los GDD demostraron capacidad predictiva sobre el rendimiento y la eficiencia térmica: correlaciones positivas significativas por especie y eficiencia térmica diferenciada (ej. acelga: 0.702 g/GDD; tomate: 0.450 g/GDD). Este resultado valida su utilidad como herramienta para planificación de siembras y cosechas en función de condiciones locales.

Hipótesis específica 3 — ACEPTADA.

La sostenibilidad del huerto urbano se corroboró a partir de un enfoque de integración metodológica, que combinó: (i) indicadores emergéticos (EYR = 1.13; ESI = 0.14; %Renovables



= 11.2%), (ii) la eficiencia técnica media estimada con SFA ($ET = 0.784$), (iii) la integral térmica (GDD) asociada al rendimiento por especie, y (iv) las correlaciones positivas y significativas entre productividad, eficiencia térmica y eficiencia técnica. Esta convergencia empírica demuestra que la articulación de los tres ejes metodológicos —SFA, emergía e integral térmica— ofrece una validación más robusta de la hipótesis que cualquier análisis aislado, consolidando la evaluación integral de la sostenibilidad de los huertos urbanos familiares.

4.6.3 Viabilidad del modelo de huerto urbano familiar

La evaluación integral de la factibilidad técnica, energética y práctica confirmó la viabilidad favorable del modelo de huerto urbano familiar como estrategia de seguridad alimentaria en ciudades intermedias mexicanas.

Factibilidad técnica

- Eficiencia técnica media: 0.784 (≥ 0.70 , umbral mínimo de viabilidad).
- Potencial de mejora: +21.6% proyectado sin cambios tecnológicos.
- Rendimientos medios: 2.57 kg/m², competitivos a escala familiar.
- Adaptación climática: todas las especies completaron sus requerimientos térmicos.
- Diversificación: cuatro especies con distribución productiva equilibrada.

Viabilidad energética

- Autonomía actual: dependencia externa 88.1%, %Renovables 11.2%.
- Optimización potencial: compost doméstico y captación pluvial podrían elevar %Renovables a 20–22% y ESI de 0.14 a 0.20–0.25.
- Resiliencia: trabajo humano (75.8% de la emergía total) constituye un recurso local clave.



Practicidad de implementación

- Requerimientos mínimos: superficie 6–8 m², inversión \$2,850–3,200 MXN, 2.5–3.5 h/semana de trabajo familiar.
- Adaptabilidad urbana: aplicable en azoteas, patios, balcones y contenedores.
- Escalabilidad: potencial replicable en 60–70% de viviendas poblanas, con impacto alimentario del 12–18% en dieta familiar.

Índice de viabilidad integral

Se construyó un índice compuesto con ponderación igualitaria entre factibilidad técnica, sostenibilidad energética y practicidad ($w = 0.33$ cada una).

Tabla 23.

Índice de viabilidad integral por especie.

Especie	Factibilidad Técnica	Sostenibilidad Energética	Practicidad	Viabilidad Total
Acelga	0.89	0.72	0.85	0.82
Lechuga	0.76	0.68	0.81	0.75
Espinaca	0.71	0.74	0.83	0.76
Tomate	0.65	0.58	0.67	0.63
Sistema	0.75	0.68	0.79	0.74

El índice integrado (0.74) ubica al sistema por encima del umbral de viabilidad (≥ 0.65). La acelga (0.82) se consolida como cultivo estratégico, mientras que el tomate (0.63) resulta viable solo bajo condiciones micro climáticas y de manejo específicas.



CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones por objetivo específico

Objetivo específico 1: Identificación de factores socioambientales

Los factores socioambientales que inciden en la autonomía energética y eficiencia técnica de huertos urbanos familiares fueron identificados y cuantificados mediante encuestas estructuradas (n=240, sección 4.1) y caracterización biofísica. Como se evidencia en la Tabla 18, los grados-día de desarrollo (GDD) emergieron como el factor determinante más significativo ($\delta_1 = -0.234$, $p = 0.009$), mientras que la disponibilidad de agua mostró elasticidad productiva positiva ($\beta_2 = 0.198$, $p = 0.008$) según los resultados del modelo SFA. El trabajo familiar representó 75.8% de la energía total del sistema (sección 4.4.1), confirmándose como recurso estratégico de autonomía local.

La disponibilidad de agua mostró elasticidad productiva positiva ($\beta_2 = 0.198$, $p = 0.008$), mientras que el trabajo familiar representó 75.8% de la energía total del sistema, confirmándose como recurso estratégico de autonomía local. La radiación solar, integrada en el análisis energético, contribuyó al 11.1% de la base renovable a través de servicios de evapotranspiración.

Objetivo específico 2: Implementación del diseño experimental

El diseño experimental fue implementado exitosamente en tres sitios urbanos de Puebla, generando 144 observaciones individuales que produjeron los rendimientos diferenciados reportados en la Tabla 4: acelga (530.6 ± 44.8 g/planta), tomate (542.8 ± 87.5 g/planta), lechuga (326.1 ± 24.5 g/planta) y espinaca (233.5 ± 18.0 g/planta). La productividad total del sistema alcanzó 2.57 kg/m² por ciclo (sección 4.2.3), con variabilidad espacial significativa entre sitios ($F = 4.83$, $p = 0.009$) que confirmó la influencia de microclimas urbanos en el desempeño productivo.

Los datos productivos obtenidos revelaron rendimientos diferenciados: acelga (530.6 ± 44.8 g/planta), tomate (542.8 ± 87.5 g/planta), lechuga (326.1 ± 24.5 g/planta) y espinaca (233.5



± 18.0 g/planta), con productividad total del sistema de 2.57 kg/m² por ciclo. La variabilidad espacial significativa entre sitios ($F = 4.83$, $p = 0.009$) confirmó la influencia de microclimas urbanos en el desempeño productivo.

Objetivo específico 3: Monitoreo de variables climáticas

El monitoreo continuo de variables climáticas mediante datalogger GSP-6 permitió calcular con precisión los grados-día de desarrollo para cada especie, cuyos requerimientos térmicos específicos fueron satisfechos según se documenta en la Tabla 6: tomate (1,204.9 GDD en 124 días), acelga (756.0 GDD en 56 días), lechuga (612.4 GDD en 50 días) y espinaca (458.1 GDD en 38 días). Las correlaciones significativas entre temperatura media y rendimiento confirmaron la dependencia térmica (sección 4.3.3): tomate ($r = 0.71$, $p < 0.01$), acelga ($r = 0.48$, $p < 0.05$), lechuga ($r = 0.55$, $p < 0.05$). Los requerimientos térmicos específicos fueron satisfechos: tomate (1,204.9 GDD en 124 días), acelga (756.0 GDD en 56 días), lechuga (612.4 GDD en 50 días) y espinaca (458.1 GDD en 38 días). Las temperaturas base diferenciadas (10°C para tomate, 5°C para hortalizas de hoja) demostraron ser parámetros críticos para predicción fenológica, con ratios de eficiencia térmica entre 1.01-1.02.

Objetivo específico 4: Cuantificación del crecimiento y rendimiento

La cuantificación del crecimiento vegetal reveló patrones especies-específicos relacionados con las condiciones climáticas monitoreadas. Como se evidencia en la Tabla 7, la acelga mostró la mayor eficiencia térmica (0.702 g/GDD) y estabilidad entre sitios (CV = 8.4%), mientras que el tomate presentó mayor sensibilidad microclimática (CV = 16.1%) según los resultados de la sección 4.2.1. La eficiencia en el aprovechamiento térmico varió sistemáticamente: acelga > lechuga > espinaca > tomate, proporcionando criterios objetivos para selección de especies.



La acelga mostró la mayor eficiencia térmica (0.702 g/GDD) y estabilidad entre sitios (CV = 8.4%), mientras que el tomate presentó mayor sensibilidad microclimática (CV = 16.1%) pese a su volumen absoluto. Las correlaciones significativas entre temperatura media y rendimiento confirmaron la dependencia térmica: tomate ($r = 0.71$, $p < 0.01$), acelga ($r = 0.48$, $p < 0.05$), lechuga ($r = 0.55$, $p < 0.05$), con espinaca mostrando mayor tolerancia a variación térmica ($r = 0.41$, n.s.).

Objetivo específico 5: Análisis de integral térmica

El análisis de integral térmica demostró su utilidad como herramienta predictiva según los resultados de la sección 4.3. La acumulación de GDD permitió determinar ventanas de siembra óptimas con precisión del 85-92% para hortalizas de hoja y 78% para tomate, como se documenta en la sección 4.3.1. El modelo térmico explicó entre 38-71% de la varianza en rendimiento según especie, validando empíricamente su capacidad predictiva para la planificación fenológica.

La eficiencia en el aprovechamiento térmico varió sistemáticamente: acelga > lechuga > espinaca > tomate, proporcionando criterios objetivos para selección de especies según disponibilidad térmica local. El modelo térmico explicó entre 38-71% de la varianza en rendimiento según especie.

Objetivo específico 6: Estimación de autonomía energética y eficiencia técnica

La autonomía energética del sistema fue estimada mediante balance completo de flujos energéticos (Tabla 9), revelando una estructura dominada por insumos comprados (88.1%) pero con base renovable significativa (11.2%). Los indicadores energéticos calculados en la sección 4.4.2 posicionaron el sistema en sostenibilidad restringida pero viable: EYR = 1.13, ELR = 7.89, ESI = 0.14, transformicidad = 4.51×10^6 seJ/J. La eficiencia técnica media estimada por el modelo SFA fue 0.784 (Tabla 14), con potencial de mejora del 21.6% sin cambios tecnológicos. Los indicadores energéticos posicionaron el sistema en sostenibilidad restringida pero viable: EYR =



1.13, ELR = 7.89, ESI = 0.14, transformicidad = 4.51×10^6 seJ/J. La eficiencia técnica media estimada por el modelo SFA fue 0.784, con heterogeneidad significativa entre especies (acelga: 0.847; tomate: 0.721) y potencial de mejora del 21.6% sin cambios tecnológicos.

Objetivo específico 7: Integración metodológica

La integración metodológica SFA-Energía-Integral Térmica se consolidó exitosamente mediante la incorporación de GDD y energía total como determinantes ambientales de ineficiencia técnica, según se documenta en la Tabla 18. El modelo integrado explicó el 68.1% de la varianza en el rendimiento, con parámetros de ajuste robustos: Log-verosimilitud = -89.32, $\gamma = 0.742$ ($p < 0.001$), validando la especificación estocástica. Los efectos diferenciados de variables térmicas ($\delta_1 = -0.234$, $p = 0.009$) y energéticas ($\delta_2 = 0.189$, $p = 0.013$) sobre eficiencia técnica, reportados en la sección 4.5.3, validaron empíricamente la relevancia de factores ambientales en productividad urbana.

Objetivo específico 8: Evaluación de sustentabilidad integral

La evaluación de sustentabilidad mediante índice multidimensional integrado (Tabla 20) reveló que la acelga presenta el mayor potencial de sostenibilidad (índice = 0.84), seguida por lechuga (0.24), espinaca (0.02) y tomate (-0.77). El análisis de componentes principales identificó dos dimensiones fundamentales que explican el 78.4% de la varianza total: "eficiencia productiva-térmica" (52.1%) y "sostenibilidad energética" (26.3%), cuya integración se desarrolla metodológicamente en el capítulo 3 y se valida empíricamente en la sección 4.6.1. El sistema integrado alcanzó índice de viabilidad de 0.74 (Tabla 23), superando el umbral establecido (≥ 0.65), lo que confirma factibilidad técnica, energética y práctica para replicación en ciudades intermedias mexicanas.



5.2 Respuesta a las preguntas de investigación

Pregunta 1: *¿Cuáles son los factores socioambientales que inciden en la autonomía energética y en la eficiencia técnica de la producción sustentable de alimentos vegetales en huertos urbanos familiares?*

Los factores socioambientales determinantes identificados se categorizan en cuatro dimensiones principales:

Factores térmicos: Los grados-día de desarrollo constituyen el factor predictivo más significativo, explicando 27.4% de la varianza en eficiencia técnica. La acumulación térmica diferencial entre especies (458.1-1,204.9 GDD) determina ventanas productivas específicas y potencial de rendimiento.

Factores hídricos: La disponibilidad y manejo del agua presentó elasticidad productiva de 0.198, con eficiencia superior en huertos urbanos (reducción 66% versus agricultura convencional). La captación pluvial y riego controlado emergieron como estrategias clave de autonomía hídrica.

Factores energéticos: El trabajo familiar (75.8% de energía total) se confirmó como recurso estratégico de autonomía local, mientras que la dependencia de lombricomposta comercial (8.9% energía total) representa el principal factor limitante externo.

Factores espaciales y micro climáticos: La variabilidad entre sitios urbanos (diferencias de eficiencia técnica hasta 9.3%) confirma la influencia determinante de exposición solar, protección contra viento y características de drenaje en el desempeño integral.



Pregunta 2: ¿Cuál es el efecto de la temperatura ambiente, medida en grados-día de desarrollo, sobre la producción sustentable de alimentos vegetales en el huerto urbano?

La temperatura ambiente, operacionalizada mediante grados-día de desarrollo, ejerce efectos diferenciados pero sistemáticos sobre la producción sustentable:

Efectos especies-específicos: Las hortalizas de hoja (acelga, lechuga, espinaca) mostraron mayor eficiencia térmica (0.51-0.70 g/GDD) y estabilidad productiva bajo variación térmica, mientras que el tomate mostró sensibilidad elevada ($r = 0.68$) con menor aprovechamiento térmico (0.45 g/GDD).

Capacidad predictiva: Los modelos basados en GDD permitieron predicción de fechas de cosecha con precisión del 85-92% para hortalizas de hoja y 78% para tomate, confirmando su utilidad como herramienta de planificación.

Optimización de manejo: La integral térmica facilita optimización de fechas de siembra, rotación de cultivos y selección de especies según disponibilidad térmica estacional, maximizando aprovechamiento de recursos climáticos locales.

Efecto sobre eficiencia técnica: El coeficiente negativo de GDD en la función de ineficiencia ($\delta_1 = -0.234$, $p = 0.009$) confirma que mayor acumulación térmica reduce ineficiencia técnica, validando la integral térmica como determinante de productividad sustentable.

Pregunta 3: ¿Qué aspectos energéticos, sociales, económicos y ambientales determinan la sustentabilidad del huerto urbano familiar en la producción de alimentos vegetales?

La sustentabilidad del huerto urbano familiar resulta de la interacción compleja de múltiples aspectos:

Aspectos energéticos: La estructura emergética revela sostenibilidad restringida pero viable ($ESI = 0.14$) con potencial de mejora mediante optimización de flujos internos. La alta



intensidad energética del trabajo familiar (75.8%) representa fortaleza de autonomía local, mientras que la dependencia de insumos procesados (88.1%) constituye la principal vulnerabilidad energética.

Aspectos sociales: El trabajo familiar intensivo (7.8 h/kg versus 2.1 h/kg en milpa tradicional) refleja la naturaleza social del modelo, que requiere disponibilidad de tiempo y conocimientos especializados. La transmisión intergeneracional de saberes agroecológicos y la cohesión comunitaria emergen como factores críticos de sostenibilidad social.

Aspectos económicos: La eficiencia técnica promedio (0.784) con margen de mejora del 21.6% indica viabilidad económica condicionada a optimización de manejo. Los rendimientos espaciales extraordinarios (23.4 kg/m²/año) compensan parcialmente la intensidad de insumos, generando retornos económicos competitivos en contextos urbanos.

Aspectos ambientales: La base renovable limitada (11.2%) pero superior a sistemas convencionales, junto con la carga ambiental moderada (ELR = 7.89), posicionan el modelo como ambientalmente defendible. La diversidad productiva (4 especies) y el reciclaje de nutrientes mediante lombricomposta contribuyen a la resiliencia ambiental del sistema.

Potencial de optimización emergética: La aplicación de estrategias de optimización, calculadas mediante los supuestos metodológicos detallados en la sección 4.4.3, podría elevar la renovabilidad actual (11.2%) hasta 18.5-22.3%, mejorando el índice de sostenibilidad emergética (ESI) de 0.14 hacia valores de 0.20-0.25. Esta mejora se basaría en amortización de insumos de capital, sustitución parcial por compost doméstico, captación pluvial y mejoras en eficiencia técnica, posicionando gradualmente el sistema hacia sostenibilidad moderada según criterios de Brown & Ulgiati (2004).



En síntesis, las respuestas a estas preguntas de investigación confirman que la sustentabilidad de los huertos urbanos familiares no emerge de un factor aislado, sino de la interacción sinérgica entre disponibilidad térmica, autonomía energética, eficiencia técnica y condiciones socioambientales locales, validando el enfoque metodológico integrado propuesto.

5.3 Contribuciones científicas y metodológicas

Innovación metodológica principal

Esta investigación desarrolla la primera integración metodológica SFA-Energía-Integral Térmica aplicada a sistemas agroecológicos urbanos, superando las limitaciones de enfoques unidimensionales tradicionales. La incorporación de grados-día de desarrollo y energía total como determinantes ambientales de ineficiencia técnica en modelos de frontera estocástica constituye una innovación conceptual que permite evaluación simultánea de eficiencia productiva, disponibilidad climática y autonomía energética.

Contribuciones teóricas específicas

Marco conceptual integrado: El desarrollo del modelo conceptual que articula variables biofísicas (GDD), energéticas (energía) y econométricas (SFA) en una evaluación holística de sostenibilidad urbana aporta un paradigma analítico novel para sistemas agrícolas complejos.

Operacionalización de autonomía emergética: La cuantificación de autonomía emergética en huertos urbanos familiares mediante descomposición de flujos R-N-F y cálculo de indicadores ESI, EYR, ELR proporciona métricas objetivas para evaluación de dependencia externa y resiliencia energética en contextos urbanos.

Modelado térmico urbano: La adaptación de modelos de integral térmica a microclimas urbanos mediante calibración con datos locales y ajuste por temperaturas base especies-específicas establece metodología replicable para planificación agroclimática urbana.



Contribuciones empíricas

Base de datos experimental: La generación de 144 observaciones individuales bajo condiciones controladas en huertos urbanos reales proporciona un dataset comprehensivo que articula variables productivas, térmicas, energéticas y de eficiencia técnica en sistemas urbanos familiares mexicanos.

Benchmarks de eficiencia: El establecimiento de referencias de eficiencia técnica por especie (acelga: 0.847, lechuga: 0.791, espinaca: 0.778, tomate: 0.721) y parámetros térmicos específicos (temperaturas base, GDD requeridos, eficiencia térmica) genera estándares cuantitativos para evaluación comparativa.

Validación empírica de hipótesis: La confirmación estadística de efectos diferenciados de variables térmicas y energéticas sobre eficiencia técnica ($\delta_1 = -0.234$, $\delta_2 = 0.189$) valida empíricamente la relevancia de factores ambientales en productividad urbana.

Contribuciones metodológicas aplicadas

Protocolo de inocuidad agroecológica: El desarrollo de protocolos preventivos basados en agua potable, lombricomposta certificada y eliminación de agroquímicos establece estándares operativos para garantizar seguridad alimentaria en huertos urbanos familiares.

Índice multidimensional de sostenibilidad: La creación del índice integrado que combina eficiencia productiva, térmica, energética y técnica proporciona herramienta de evaluación holística replicable en sistemas urbanos similares.

Calibración climática urbana: La metodología de calibración cruzada entre datos in situ y estaciones meteorológicas oficiales mediante regresiones lineales establece protocolo estándar para monitoreo climático en experimentos urbanos.



5.4 Implicaciones para políticas públicas

Recomendaciones para programas municipales en Puebla

Focalización estratégica de especies: Los resultados confirman que los programas municipales deben priorizar acelga y lechuga como cultivos base debido a su superior viabilidad integral (0.82 y 0.75 respectivamente), reservando tomate para productores con experiencia avanzada y condiciones microclimáticas óptimas.

Criterios de selección de beneficiarios: La variabilidad significativa entre sitios urbanos (diferencias de eficiencia hasta 9.3%) indica que los programas deben incorporar evaluación de condiciones microclimáticas (exposición solar, protección contra viento, drenaje) como criterios de elegibilidad para maximizar probabilidades de éxito.

Componente de capacitación técnica: La brecha de mejora identificada (21.6% potencial sin cambios tecnológicos) justifica inversión sustancial en capacitación técnica especializada, particularmente en manejo térmico, uso eficiente de lombricomposta y planificación fenológica basada en GDD.

Recomendaciones para política estatal y federal

Integración en programas de seguridad alimentaria: Los rendimientos espaciales documentados (2.57 kg/m² por ciclo) y diversidad nutricional del sistema justifican incorporación de huertos urbanos familiares en estrategias nacionales de combate a inseguridad alimentaria, particularmente en zonas urbanas vulnerables.

Marco regulatorio de insumos orgánicos: La dependencia crítica de lombricomposta comercial (8.9% emergía total) requiere desarrollo de marcos regulatorios que garanticen disponibilidad, calidad y precios accesibles de insumos orgánicos certificados para pequeños productores urbanos.



Incentivos fiscales diferenciados: La estructura emergética identificada (88.1% dependencia externa en ciclo inicial, mejora proyectada a 65-70% en ciclos posteriores) sugiere que incentivos fiscales deben diferenciarse temporalmente, con apoyo intensivo en arranque y reducción gradual conforme se consolida autonomía.

Implicaciones para ciudades intermedias similares

Replicabilidad del modelo: El índice de viabilidad integral (0.74) y condiciones biofísicas de Puebla (altitud 2,135 m, clima subhúmedo, temperatura media 16.6°C) establecen parámetros de referencia para identificar ciudades intermedias con potencial de replicación exitosa del modelo.

Adaptación climática regional: Los parámetros térmicos documentados (temperaturas base, GDD requeridos) proporcionan base científica para adaptación del modelo a diferentes zonas climáticas mediante ajuste de especies, fechas de siembra y manejo térmico específico.

Escalabilidad urbana: La factibilidad técnica demostrada (superficie mínima 6-8 m², inversión inicial \$2,850-3,200 MXN, 2.5-3.5 h/semana) establece parámetros realistas para estimación de potencial de escalamiento en ciudades con características socioeconómicas similares.

5.5 Limitaciones del estudio

Limitaciones metodológicas

Escala temporal restringida: El análisis se limitó a un ciclo productivo único (febrero-mayo 2022), impidiendo evaluación de estabilidad interanual y efectos de variabilidad climática de largo plazo sobre la sostenibilidad integral del sistema.

Tamaño muestral y representatividad: La muestra de 144 plantas distribuidas en tres sitios, aunque estadísticamente suficiente para detectar diferencias $\geq 15\%$ en rendimiento, limita la



generalización a la diversidad completa de microclimas urbanos existentes en la zona metropolitana de Puebla.

Condiciones controladas versus realidad: El diseño experimental con sustrato estandarizado, riego controlado y manejo homogéneo no refleja completamente la heterogeneidad de condiciones reales que enfrentan familias urbanas con diferentes niveles de experiencia, recursos y compromiso temporal.

Limitaciones de especificación del modelo

Variables socioculturales no cuantificadas: Factores como saberes tradicionales, motivación familiar, redes sociales de apoyo y características sociodemográficas específicas no pudieron incorporarse cuantitativamente en el modelo SFA, limitando la evaluación completa de determinantes socioambientales.

Función de producción Cobb-Douglas: La especificación funcional asume elasticidades constantes y rendimientos de escala fijos, lo que puede no reflejar completamente las complejidades no lineales de sistemas agroecológicos urbanos, particularmente en rangos extremos de insumos.

Agregación de especies: El modelo SFA estimado de forma agregada, aunque controlando por efectos fijos de especie, puede no capturar completamente las interacciones específicas entre insumos y especies individuales, particularmente para tomate que mostró comportamiento diferenciado.

Limitaciones de extrapolación

Especificidad geográfica: Los resultados corresponden específicamente a condiciones biofísicas de Puebla (altitud, clima, suelos urbanos), limitando la extrapolación directa a ciudades con características ambientales sustancialmente diferentes sin ajustes metodológicos apropiados.



Contexto socioeconómico: El estudio se desarrolló en contexto de familias urbanas mexicanas de clase media, con acceso a servicios básicos y capacidad de inversión inicial, limitando aplicabilidad a contextos de pobreza urbana extrema o diferentes estructuras familiares.

Inocuidad alimentaria: El enfoque preventivo adoptado, basado en prácticas agroecológicas sin verificación analítica de contaminantes, aunque metodológicamente coherente, no proporciona confirmación empírica de niveles de inocuidad alcanzados versus estándares internacionales.

5.6 Líneas futuras de investigación

Investigación metodológica avanzada

Modelos de frontera no paramétricos: Desarrollar aplicaciones de Data Envelopment Analysis (DEA) y métodos de kernel para validar robustez de resultados SFA y explorar especificaciones funcionales más flexibles que capturen no linealidades en relaciones insumo-producto de sistemas urbanos complejos.

Integración de variables socioeconómicas: Incorporar variables latentes mediante modelos de ecuaciones estructurales (SEM) que capturen efectos de capital social, conocimientos tradicionales, motivación familiar y redes comunitarias sobre eficiencia técnica y sostenibilidad emergética.

Análisis temporal dinámico: Implementar modelos SFA de panel que capturen evolución temporal de eficiencia técnica, aprendizaje tecnológico y efectos de experiencia acumulada en huertos urbanos familiares a través de múltiples ciclos productivos.

Investigación aplicada interdisciplinaria

Evaluación de servicios ecosistémicos: Cuantificar y valorar económicamente servicios ecosistémicos urbanos proporcionados por huertos familiares (regulación microclimática, captura



de carbono, infiltración pluvial, conservación de biodiversidad) mediante metodologías de valoración contingente y costos de reemplazo.

Análisis nutricional y de inocuidad: Desarrollar evaluación comprehensiva de contenido nutricional, presencia de metales pesados, residuos químicos y contaminantes microbiológicos en productos de huertos urbanos versus agricultura convencional bajo diferentes condiciones de suelo urbano.

Impacto en salud pública: Investigar efectos de consumo de alimentos producidos en huertos urbanos familiares sobre indicadores de salud nutricional, bienestar psicológico y cohesión social mediante estudios longitudinales controlados.

Investigación de escalamiento y política pública

Análisis de escalabilidad urbana: Desarrollar modelos de simulación espacial que evalúen potencial de escalamiento de huertos urbanos familiares en diferentes tipologías urbanas, considerando restricciones de espacio, infraestructura, demografía y condiciones socioeconómicas.

Evaluación de políticas públicas: Implementar análisis cuasi-experimentales que evalúen efectividad, costo-efectividad y sostenibilidad de diferentes diseños de programas públicos de promoción de huertos urbanos mediante comparación de municipios con y sin intervención.

Modelos de negocio e innovación social: Investigar viabilidad de modelos de negocio social, cooperativas de insumos, mercados locales y sistemas de intercambio comunitario que fortalezcan sostenibilidad económica y social de huertos urbanos familiares.



Investigación en variaciones térmicas y resiliencia

Escenarios de variaciones térmicas: Modelar impactos de escenarios climáticos futuros (temperatura, precipitación, eventos extremos) sobre productividad, requerimientos hídricos y viabilidad de especies en huertos urbanos mediante modelos de circulación global downscaling.

Estrategias de adaptación: Desarrollar y evaluar estrategias de adaptación a las variaciones térmicas específicas para huertos urbanos (selección de variedades, técnicas de conservación de agua, manejo térmico, diversificación de cultivos) mediante experimentos de campo de largo plazo.

Resiliencia alimentaria urbana: Investigar contribución de redes de huertos urbanos familiares a resiliencia alimentaria metropolitana mediante modelado de sistemas complejos que simule interrupciones de cadenas de suministro externas y capacidad de respuesta local.

En conclusión, los resultados demuestran que la sostenibilidad y el desempeño productivo de los huertos urbanos familiares en Puebla emergen de la integración empíricamente validada de tres ejes: disponibilidad térmica (GDD) como condicionante biofísico de la ineficiencia técnica, estructura emergética como base de autonomía y carga ambiental, y eficiencia técnica estimada por SFA como métrica operativa de uso de recursos; esta articulación permitió explicar la variabilidad del rendimiento con ajuste estadístico robusto, identificar sinergias entre desempeño productivo, eficiencia térmica y eficiencia técnica, así como reconocer compensaciones con la autonomía energética, todo ello con soporte en un diseño experimental controlado y análisis multivariado reproducible. La evidencia converge en que hortalizas de hoja—especialmente la acelga—presentan viabilidad superior en contextos urbanos por su mayor eficiencia térmica y técnica, mientras que especies más demandantes, como el tomate, requieren condiciones microclimáticas y de manejo más estrictas; no obstante, el sistema exhibe un margen claro de



mejora sin cambios tecnológicos, y las diferencias espaciales observadas subrayan la relevancia del microclima urbano. Estas conclusiones, formuladas con cautela metodológica (interpretación apropiada de parámetros de ineficiencia, uso de pseudo- R^2 informativo y métricas de ajuste, y tratamiento prudente de la variabilidad), proporcionan una base sólida para la discusión de implicaciones y el diseño de estrategias de fortalecimiento en capítulos subsecuentes.



LITERATURA CITADA

1. Aigner, D., Lovell, C. A. K., & Schmidt, P. (1977). Formulation and estimation of stochastic frontier production function models. *Journal of Econometrics*, 6(1), 21–37. [https://doi.org/10.1016/0304-4076\(77\)90052-5](https://doi.org/10.1016/0304-4076(77)90052-5)
2. Akbar, A., Rumallang, A., Rahmawati, C., & Rusman, M. A. (2024). Análisis de la eficiencia del cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en tierras de montaña mediante un análisis estocástico de frontera: Evidencia de Gowa, Indonesia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 18(3), Article e18355.
3. Altieri, M. A. (2002). Agroecology: the science of natural resource management for poor farmers in marginal environments. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 93(1–3), 1–24. [https://doi.org/10.1016/s0167-8809\(02\)00085-3](https://doi.org/10.1016/s0167-8809(02)00085-3)
4. Alvarez-Lima, J., Morejón-Mesa, Y., & del Pozo-Rodríguez, P. P. (2020). Fundamentos teórico-metodológicos para la implementación de la síntesis emergética en sistemas agropecuarios. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 29(2), 84–92. <https://revistas.unah.edu.cu/index.php/rcta/article/view/1259> revistas.unah.edu.cu+1
5. Andrews, N., Coop, L., Stoven, H., Noordijk, H., & Heinrich, A. (2020). Vegetable degree-day models: An introduction for farmers and gardeners (EM 9305). Oregon State University Extension Service. <https://extension.oregonstate.edu/catalog/pub/em-9305-vegetable-degree-day-models-introduction-farmers-gardeners>
6. Anushi, Krishnamoorthi, A., Chaurasia, J., Baidya, B. K., Singh, A., Sapna, Kumar, V., & Singh, A. (2024, abril). A comprehensive review on evolution, challenges of models, opportunities in urban farming practices in the world. *Journal of Scientific Research and Reports*, 30(6), 136–156. <https://doi.org/10.9734/jsrr/2024/v30i62028>



7. Appeaning Addo, K. (2010). Urban and peri-urban agriculture in developing countries studied using remote sensing and in situ methods. *Remote Sensing*, 2(2), 497–513. <https://doi.org/10.3390/rs2020497>
8. Arroyo-Lambaer, D., Zambrano, L., Rivas, M. I., Vázquez-Mendoza, D. L., Figueroa, F., Puente-Urbe, M. B., Espinosa-García, A. C., Tapia-Palacios, M. A., Mazari-Hiriart, M., Revollo-Fernández, D., Jiménez-Serna, A., Covarrubias, M., & Sumano, C. (2022). Identifying Urban Agriculture Needs and Challenges for the Implementation of Green Labeling in Xochimilco, Mexico. *Frontiers in Sustainable Cities*, 4. <https://doi.org/10.3389/frsc.2022.892341>
9. Asamblea General de las Naciones Unidas. (2015, 25 de septiembre). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (Resolución A/RES/70/1). <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
10. Asgharipour, M. R., Amiri, Z., & Campbell, D. E. (2021). A cost-benefit analysis of applying urban agriculture in sustainable park design. *Land Use Policy*, 112, Article 105834. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105834>
11. Ashardiono, F., & Cassim, M. (2015). Adapting to climate change: Challenges for Uji tea cultivation. *International Journal of Sustainable Future for Human Security*, 3(1), 32-36. <https://doi.org/10.24910/jsustain/3.1/3236>
12. Athearn, K., Wooten, H., Felter, L., Campbell, C. G., Ryals, J. M., Lollar, M. C., Popenoe, J., Bravo, L., Duncan, L., Court, C., & Wilber, W. (2014). What are the economic costs and benefits of home vegetable gardens? UF/IFAS Extension, Publication FCS3308.



13. Audate, P. P., Fernandez, M. A., Cloutier, G., & Lebel, A. (2019). Scoping review of the impacts of urban agriculture on the determinants of health. *BMC Public Health*, 19(1). <https://doi.org/10.1186/s12889-019-6885-z>
14. Aune, D. (2019). Plant foods, antioxidant biomarkers, and the risk of cardiovascular disease, cancer, and mortality: A review of the evidence. *Advances in Nutrition*, 10(Suppl_4), S404-S421. <https://doi.org/10.1093/advances/nmz042>
15. Aune, D., Giovannucci, E., Boffetta, P., Fadnes, L. T., Keum, N., Norat, T., Greenwood, D. C., Riboli, E., Vatten, L. J., & Tonstad, S. (2017). Fruit and vegetable intake and the risk of cardiovascular disease, total cancer and all-cause mortality—A systematic review and dose-response meta-analysis of prospective studies. *International Journal of Epidemiology*, 46(3), 1029-1056. <https://doi.org/10.1093/ije/dyw319>
16. Ayuntamiento del Municipio de Puebla, Secretaría de Bienestar. (2021, abril). Lineamientos para el funcionamiento del Programa de Huertos urbanos familiares (Clave: MPC11821/RLIN/SB/129-A/070421, Revisión 02). Gobierno del Estado de Puebla.
17. Ballesteros, M. (2022, August 11). AgTech in Latin America: Small-scale solutions in a large-scale transformation. *Economist Impact*. <https://impact.economist.com/new-globalisation/agtech-latin-america-small-scale-solutions-large-scale-transformation>
18. Battese, G. E., & Coelli, T. J. (1992). Frontier production functions, technical efficiency and panel data: With application to paddy farmers in India. *Journal of Productivity Analysis*, 3(1-2), 153-169. <https://doi.org/10.1007/BF00158774>
19. Boardman, A. E., Greenberg, D. H., Vining, A. R., & Weimer, D. L. (2017). *Cost-benefit analysis: Concepts and practice* (5th ed.). Cambridge University Press.



20. Bravo-Ureta, B. E., & Pinheiro, A. E. (1997). Technical, economic, and allocative efficiency in peasant farming: Evidence from the Dominican Republic. *The Developing Economies*, 35(1), 48-67.
21. Bravo-Ureta, B. E., & Rieger, L. (1991). Dairy farm efficiency measurement using stochastic frontiers and neoclassical duality. *American Journal of Agricultural Economics*, 73(2), 421-428.
22. Bravo-Ureta, B. E., Solís, D., López, V. H. M., Maripani, J. F., Thiam, A., & Rivas, T. (2007). Technical efficiency in farming: A meta-regression analysis. *Journal of Productivity Analysis*, 27(1), 57-72.
23. Brown, M. T., & Ulgiati, S. (1999). Emergy evaluation of the biosphere and natural capital. *Ambio*, 28(6), 486–493.
24. Calvache, I., et al. (2021). The use of thermal time to describe and predict growth and nutritive value in forage species. *Agronomy*, 11(4), 774. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040774>
25. Campbell, D. E., et al. (2024). Emergy accounting and transformity in production systems: clarifying concepts and applications. *Frontiers in Energy Research*. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1392634>
26. Cao, W., White, J. W., & Wang, E. (2009). *Crop modeling and decision support*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01132-0>
27. Capron, G., González Arellano, S., Wigle, J., Diez, A. L., Monterrubio, A., Hidalgo, H., Morales, J., Castro, J., Sánchez-Mejorada, M. C., Huarte, M. C., Esquivel, M. T., & Flores, R. (2017). *The urban food system of Mexico City, Mexico*. Hungry Cities Partnership. African Centre for Cities, University of Cape Town; Wilfrid Laurier University. <https://hungrycities.net/publication/the-urban-food-system-of-mexico-city-mexico>



28. Castellarini, F. (2022, febrero). Urban agriculture in Latin America: A green culture beyond growing and feeding. *Frontiers in Sustainable Cities*, 3, Article 792616.
29. Challinor, A. J., Watson, J., Lobell, D. B., Howden, S. M., Smith, D. R., & Chhetri, N. (2014). A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. *Nature Climate Change*, 4(4), 287–291. <https://doi.org/10.1038/nclimate2153>
30. Chen, G. Q., Jiang, M. M., Chen, B., Yang, Z. F., & Lin, C. (2006). Emergy analysis of Chinese agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 115(1–4), 161–173. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.01.005> ScienceDirectPMC
31. Codex Alimentarius. (2004). Código de prácticas para el envasado y transporte de frutas y hortalizas frescas (CXC 44-1995). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura & Organización Mundial de la Salud. <http://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/codex-texts/codes-of-practice/en/>
32. Coelli, T., Rahman, S., & Thirtle, C. (2002). Technical, allocative, cost and scale efficiencies in Bangladesh rice cultivation: A non-parametric approach. *Journal of Agricultural Economics*, 53(3), 607-626.
33. Congreso de la Ciudad de México. (2020, 31 de diciembre). Ley de Huertos Urbanos de la Ciudad de México (Decreto publicado en la Gaceta Oficial de la Ciudad de México). Instituto de Investigaciones Legislativas. Texto vigente con última reforma publicada en la Gaceta Oficial de la Ciudad de México el 23 de marzo de 2022.
34. Congreso de los Estados Unidos Mexicanos. (2001, 7 de diciembre). Ley de Desarrollo Rural Sustentable (Nueva Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación). Diario Oficial de la Federación. Texto vigente con última reforma publicada el 7 de junio de 2024. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, Secretaría General, Secretaría de Servicios



Parlamentarios.

Disponible

en

https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/235_070624.pdf

35. Congreso del Estado Libre y Soberano de Puebla. (2013, 30 de diciembre). Ley de agricultura urbana para el Estado de Puebla (Decreto). Periódico Oficial del Estado de Puebla, Tomo CDLXIV, Número 12, Décima Novena Sección. Gobierno del Estado de Puebla, Secretaría de Gobernación, Orden Jurídico Poblano. Disponible en <https://ojp.puebla.gob.mx/legislacion-del-estado/item/109-ley-de-agricultura-urbana-para-el-estado-de-puebla>
36. Congreso del Estado Libre y Soberano de Puebla. (2013, 30 de diciembre). Ley de agricultura urbana para el Estado de Puebla (Decreto). Periódico Oficial del Estado de Puebla, Tomo CDLXIV, Número 12, Décima Novena Sección. Gobierno del Estado de Puebla, Secretaría de Gobernación, Orden Jurídico Poblano. Disponible en <https://ojp.puebla.gob.mx/legislacion-del-estado/item/109-ley-de-agricultura-urbana-para-el-estado-de-puebla> Orden Jurídico congresopuebla.mx+9 ojp.puebla.gob.mx+9 ojp.puebla.gob.mx+9
37. Consejo Nacional de Población. (2023, julio 11). Día Mundial de la Población. Las proyecciones de la población de México para los próximos 50 años: 2020–2070 [Comunicado de prensa]. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/conapo/prensa/dia-mundial-de-la-poblacion-las-proyecciones-de-la-poblacion-de-mexico-para-los-proximos-50-anos-2020-2070> url: https://conapo.segob.gob.mx/es/CONAPO/Datos_abiertos
38. Cruz, M. C. (2016, febrero). Agricultura urbana en América Latina y el Caribe: Casos concretos desde la mirada del buen vivir. Nueva Sociedad. Fundación Friedrich Ebert. https://static.nuso.org/media/documents/Ma_Caridad_Cruz.pdf



39. de Oliveira, L. C. P., Raufflet, E., & Alves, M. A. (2022). Urban agriculture in São Paulo: An analysis from the sociology of public action. *Food Security*, 14(6), 1537–1552. <https://doi.org/10.1007/s12571-022-01304-w>
40. Dhar, S., & Boruah, P. (2024). Urban agriculture and community gardens: Spatial distribution and environmental benefits. ResearchGate Technical Report, 383952646, 1-45.
41. Dixit, S., Khanna, S. K., Ramniwas, S., Tuli, H. S., Sharma, A. K., Tariq, M., Sak, K., Umber, A., Alshehri, M. M., Wig, N., & Kumar, M. (2023). Functional foods: Exploring the health benefits of bioactive compounds from plant and animal sources. *Journal of Food Quality*, 2023, 5546753. <https://doi.org/10.1155/2023/5546753>
42. Drewnowski, A., & Almiron-Roig, E. (2009). Human Perceptions and Preferences for Fat-Rich Foods. In *Frontiers in Neuroscience* (pp. 265–291). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420067767-c11> url: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK53528/>
43. Egerer, M., Karleowski, S., Conitz, F., Neumann, A. E., Schmack, J. M., & Sturm, U. (2024). In defence of urban community gardens. *People and Nature*, 6(2), 367–376. <https://doi.org/10.1002/pan3.10612>
44. Elnesr, M. N., Alazba, A. A., & Abu-Zreig, M. M. (2016). An integral model to calculate the growing degree-days and heat units, a spreadsheet application. *Computers and Electronics in Agriculture*, 124, 37-45. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.03.024>
45. Estrada, F., Mendoza-Ponce, A. M., Calderón-Bustamante, O., & Botzen, W. (2022). Impacts and economic costs of climate change on Mexican agriculture. *Regional Environmental Change*, 22, 126.



46. Fàbregues, S., & Guetterman, T. C. (2024). Editorial: Mixed Methods Research Systematic Methodological Reviews—Benefits, Challenges, and Solutions. *Journal of Mixed Methods Research*, 19(1), 6–17. <https://doi.org/10.1177/15586898241302592>
47. FAO. (2020, julio). Assessing agroforestry practices and soil and water conservation for climate change adaptation in Kenya: A cost-benefit analysis. Integrating Agriculture in National Adaptation Plans Programme (NAP-Ag). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/3/cb1503en/cb1503en.pdf>
48. FAO. (2021). Buenas prácticas agrícolas. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://www.fao.org/agriculture/crops/thematicsitemap/theme/biodiversity/good-agricultural-practices/es/>
49. Färe, R., Grosskopf, S., Lovell, C. A. K., & Pasurka, C. (1989). Multilateral productivity comparisons when some outputs are undesirable: A nonparametric approach. *The Review of Economics and Statistics*, 71(1), 90-98.
50. Farmonaut Technologies Pvt. Ltd. (2025). Maximizing crop yield: Harnessing growing degree days and pest management models for integrated field operations. Farmonaut. <https://farmonaut.com/precision-farming/maximizing-crop-yield-using-growing-degree-days-and-pest-management-models-for-integrated-field-operations>
51. Feather, P., Hellerstein, D., & Hansen, L. T. (1999). Economic valuation of environmental benefits and the targeting of conservation programs: The case of the CRP (Agricultural Economics Report No. 256). Economic Research Service, USDA.
52. Flores Guevara, A., Hernández Rodríguez, M. de L., & Velasco Hernández, M. de los Á. (2024). El potencial multidimensional de los huertos urbanos y su relación con los ODS-2030:



- Un ejercicio en la mixteca poblana de México. En D. A. Noceda León (Coord.), *Rostros de la postmodernidad: Crisis ambiental y alternativas de desarrollo sustentable en México* (pp. 185– [página final del capítulo]). El Colegio de Puebla, A.C. <https://www.researchgate.net/publication/385381695>
53. Francis, C., Lieblein, G., Gliessman, S., Breland, T. A., Creamer, N., Harwood, R., Salomonsson, L., Helenius, J., Rickerl, D., Salvador, R., Wiedenhoef, M., Simmons, S., Allen, P., Altieri, M., Flora, C., & Poincelot, R. (2003). Agroecology: The Ecology of Food Systems. *Journal of Sustainable Agriculture*, 22(3), 99–118. https://doi.org/10.1300/j064v22n03_10
54. Frija, A., Carpentier, I., Alary, V., Ouerghemmi, H., & Dhehibi, B. (2025). Agroecological transitions of pastoralism: a discussion of key concepts and investigation of current dynamics using a political economy lens. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 1–26. <https://doi.org/10.1080/21683565.2025.2541373>
55. FSIN & Global Network Against Food Crises. (2023). Global report on food crises 2023. Food Security Information Network (FSIN). <https://www.wfp.org/news/global-report-food-crises-number-people-facing-acute-food-insecurity-rose-258-million-58>
56. Gadanakis, Y., Bennett, R., Park, J., & Areal, F. J. (2015). Evaluating the sustainable intensification of arable farms. *Journal of Environmental Management*, 150, 288-298.
57. Gliessman, S. (2016). Transforming food systems with agroecology. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 40(3), 187–189. <https://doi.org/10.1080/21683565.2015.1130765>
58. Gliessman, S. R. (1998). *Agroecology: Ecological processes in sustainable agriculture* (E. Engles, Ed.). Sleeping Bear Press. ISBN 1-57504-043-3.



59. Gliessman, S. R., Guadarrama-Zugasti, C., Méndez, V. E., Trujillo, L., Bacon, C., & Cohen, R. (s. f.). Agroecología: un enfoque sustentable de la agricultura ecológica [PDF]. Universidad Complutense de Madrid. Recuperado de [https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-104576/5.%20Agroecolog%C3%ADa.%20Un%20enfoco%20sustentable%20de%20la%20agricultura%20ecol%C3%B3gica%20\(%20Stephen%20Gliessman%20et%20al.\).pdf](https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-104576/5.%20Agroecolog%C3%ADa.%20Un%20enfoco%20sustentable%20de%20la%20agricultura%20ecol%C3%B3gica%20(%20Stephen%20Gliessman%20et%20al.).pdf)
60. Gobo, G. (2023). Mixed Methods and Their Pragmatic Approach: Is There a Risk of Being Entangled in a Positivist Epistemology and Methodology? Limits, Pitfalls and Consequences of a Bricolage Methodology. *Forum Qualitative Sozialforschung / Forum: Qualitative Social Research*, Vol. 24 No. 1 (2023): Mixed Methods and Multimethod Social Research—Current Applications and Future Directions. <https://doi.org/10.17169/FQS-24.1.4005>
61. Guerrero Morales, J., & Silva Gómez, S. E. (2016). Servicios ecosistémicos brindados por los huertos urbanos en Puebla: Un estudio de caso. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
62. Guzmán Fernández, K., Moreno-Calles, A. I., Casas, A., & Blancas, J. (2020). Contributions of Urban Collective Gardens to Local Sustainability in Mexico City. *Sustainability*, 12(18), Article 7562. <https://doi.org/10.3390/su12187562>
63. Haluza, D., Ortmann, J., Lazic, T., & Hillmer, J. (2025). Urban Gardening and Public Health—A Bibliometric Analysis. *Sustainability*, 17(3), 1309. <https://doi.org/10.3390/su17031309>
64. Hernández-Pérez, T., Gómez-García, M. D. R., Valverde, M. E., & Paredes-López, O. (2020). *Capsicum annuum* (hot pepper): An ancient Latin-American crop with outstanding bioactive compounds and nutraceutical potential. A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(6), 2972-2993. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12634>



65. Hume, C., Grieger, J. A., Kalamkarian, A., D’Onise, K., & Smithers, L. G. (2022). Community gardens and their effects on diet, health, psychosocial and community outcomes: a systematic review. *BMC Public Health*, 22(1). <https://doi.org/10.1186/s12889-022-13591-1>
66. Ihle, T., Jahr, E., Martens, D., Muehlan, H., & Schmidt, S. (2024). Health Effects of Participation in Creating Urban Green Spaces—A Systematic Review. *Sustainability*, 16(12), 5000. <https://doi.org/10.3390/su16125000>
67. Jacxsens, L., Luning, P. A., van der Vorst, J. G., Devlieghere, F., Leemans, R., & Uyttendaele, M. (2010). Simulation modelling and risk assessment as tools to identify the impact of climate change on microbiological food safety - The case study of fresh produce supply chain. *Food Research International*, 43(7), 1925-1935. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.07.009>
68. Jansma, J. E., Veen, E. J., & Müller, D. (2024). Beyond urban farm and community garden, a new typology of urban and peri-urban agriculture in Europe. *Urban Agriculture & Regional Food Systems*, 9(1). <https://doi.org/10.1002/uar2.20056>
69. Johnson, R. B., Onwuegbuzie, A. J., & Turner, L. A. (2007). Toward a Definition of Mixed Methods Research. *Journal of Mixed Methods Research*, 1(2), 112–133. <https://doi.org/10.1177/1558689806298224>
70. Just, R. E., Hueth, D. L., & Schmitz, A. (2004). *The welfare economics of public policy: A practical approach to project and policy evaluation*. Edward Elgar Publishing.
71. Kanosvamaha, T. P. (2024). Sustainable Urban Agriculture: Unlocking the Potential of Home Gardens in Low-Income Communities. *The Professional Geographer*, 76(5), 587–596. <https://doi.org/10.1080/00330124.2024.2355179>
72. Khan, M. M., Akram, M. T., Janke, R., Qadri, R. W. K., Al-Sadi, A. M., & Farooque, A. A. (2022). Global impact of COVID-19 on agriculture: Role of sustainable agriculture and digital



- farming. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(34), 51318-51334.
<https://doi.org/10.1007/s11356-022-19358-w>
73. Kitinoja, L., & Kader, A. A. (2015). *Small scale postharvest handling practices: A manual for horticultural crops* (5th ed.). Postharvest Education Foundation.
74. KPMG. (2025, June). *Reimagining global food system resilience* (Publication No. 139773-G). KPMG International. <https://kpmg.com>
75. Krinsky, N. I., Landrum, J. T., & Bone, R. A. (2003). Biologic mechanisms of the protective role of lutein and zeaxanthin in the eye. *Annual Review of Nutrition*, 23, 171-201.
<https://doi.org/10.1146/annurev.nutr.23.011702.073307>
76. Kumbhakar, S. C., & Lovell, C. A. K. (2000). *Stochastic frontier analysis*. Cambridge University Press.
77. Kumbhakar, S. C., Parmeter, C. F., & Zelenyuk, V. (2020). *Stochastic frontier analysis: Foundations and advances II*. En S. C. Ray, R. G. Chambers, & S. C. Kumbhakar (Eds.), *Handbook of production economics* (pp. 583–628). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3455-8_11
78. Lal, R. (2020). Home gardening and urban agriculture for advancing food and nutritional security in response to the COVID-19 pandemic. *Food Security*, 12(4), 871-876.
<https://doi.org/10.1007/s12571-020-01058-3>
79. Langemeyer, J., Madrid-Lopez, C., Mendoza Beltrán, A., & Villalba Mendez, G. (2021). Urban agriculture — A necessary pathway towards urban resilience and global sustainability? *Landscape and Urban Planning*, 210, Article 104055.
<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104055>



80. Lansink, A. O., & Reinhard, S. (2004). Investigating technical efficiency and potential technological change in Dutch pig farming. *Agricultural Systems*, 79(3), 353-367.
81. Larson, N. I., Story, M. T., & Nelson, M. C. (2009). Neighborhood Environments. *American Journal of Preventive Medicine*, 36(1), 74-81.e10.
<https://doi.org/10.1016/j.amepre.2008.09.025>
82. Linus Pauling Institute, Oregon State University. (2019). Carotenoids. Micronutrient Information Center. <https://lpi.oregonstate.edu/mic/dietary-factors/phytochemicals/carotenoids>
83. Losada, H., Martínez, H., Vieyra, J., Pealing, R., Rivera, J., Zavala, R., & Cortés, J. (2018). Urban Agriculture in the Metropolitan Zone of Mexico City: Changes over Time in Urban, Suburban and Peri-Urban Areas. In *The Earthscan Reader in Rural–Urban Linkages* (pp. 247–264). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315800486-13>
84. Losada, H., Martínez, H., Vieyra, J., Pealing, R., Zavala, R., & Cortés, J. (1998). Urban agriculture in the metropolitan zone of Mexico City: changes over time in urban, suburban and peri-urban areas. *Environment and Urbanization*, 10(2), 37–54.
<https://doi.org/10.1177/095624789801000214>
85. Losada, H., Vargas, J. M., Cortés, J., Luna, L., & Alemán, V. (2015). Public policies affecting the development of urban agriculture in Mexico City. *Livestock Research for Rural Development*, 27(8). <http://www.lrrd.org/lrrd27/8/losa27149.html>
86. Low, S. A., Adalja, A., Beaulieu, E., Key, N., Martinez, S., Melton, A., Perez, A., Ralston, K., Stewart, H., Suttles, S., Vogel, S., & Jablonski, B. B. R. (2015). Trends in U.S. local and regional food systems: A report to Congress (AP-068). U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service.



87. Lu, M., Chen, C., Lan, Y., Xiao, J., Li, R., Huang, J., Huang, Q., Cao, Y., & Ho, C. T. (2020). Capsaicin—the major bioactive ingredient of chili peppers: Bio-efficacy and delivery systems. *Food & Function*, 11(4), 2848-2860. <https://doi.org/10.1039/D0FO00351D>
88. Mares-Perlman, J. A., Millen, A. E., Ficek, T. L., & Hankinson, S. E. (2002). The body of evidence to support a protective role for lutein and zeaxanthin in delaying chronic disease. Overview. *Journal of Nutrition*, 132(3), 518S-524S. <https://doi.org/10.1093/jn/132.3.518S>
89. McDougall, R., Kristiansen, P., & Rader, R. (2018). Small-scale urban agriculture results in high yields but requires judicious management of inputs to achieve sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(1), 129-134. <https://doi.org/10.1073/pnas.1809707115>
90. McDougall, R., Rader, R., & Kristiansen, P. (2020). Urban agriculture could provide 15% of food supply to Sydney, Australia, under expanded land use scenarios. *Land Use Policy*, 94, Article 104561. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104561>
91. Meeusen, W., & Van den Broeck, J. (1977). Efficiency estimation from Cobb-Douglas production functions with composed error. *International Economic Review*, 18(2), 435–444. <https://doi.org/10.2307/2525757>
92. Moctezuma Pérez, S., Pérez Sánchez, J. M., & Rivera Herrejón, M. G. (2015). Aportes alimenticios de los agroecosistemas tradicionales en el México rural. En S. Padilla Loredo (Ed.), *La crisis alimentaria y la salud en México* (pp. xx–xx). Castellanos.
93. Mougeot, L.J.A. (2000). Urban agriculture: Definition, presence, potentials and risks, and policy challenges. *Cities Feeding People Series*, IDRC.
94. Mougeot, L.J.A. (2006). *Growing Better Cities: Urban Agriculture for Sustainable Development*. IDRC.



95. Muñoz-Nuñez, E., Romero Arenas, O., & Huerta Lara, M. (2022). Cultura y sostenibilidad del huerto urbano. En G. Ortega López, N. L. Ramírez Rosete, & G. C. Santiago Azpiazu (Coords.), *La transformación del territorio desde la experiencia académica del urbanismo* (pp. 98–120). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. ISBN 978-607-525-906-2
96. Muñoz-Nuñez, E., Romero-Arenas, O., Silva Gómez, S. E., Rueda Luna, R., Munguía Pérez, R., & Huerta-Lara, M. (2025). Stochastic Frontier Model for the Evaluation of the Sustainability of Urban Gardens in Puebla, Mexico. *Urban Science*, 9(5), 164. <https://doi.org/10.3390/urbansci9050164>
97. Nalley, L. L., Barkley, A., Watkins, B., & Hignight, J. (2009). Enhancing farm profitability through portfolio analysis: The case of spatial rice variety selection. *Journal of Agricultural and Applied Economics*, 41(3), 641-652.
98. Nguyen, H. T. (2020). A closer look at stochastic frontier analysis in economics. *Asian Journal of Economics and Banking*, 4(3), 3–28. <https://doi.org/10.1108/AJEB-07-2020-0032>
99. Nicholls, E., Ely, A., Birkin, L., Basu, P., & Goulson, D. (2020). The contribution of small-scale food production in urban areas to the sustainable development goals: A review and case study. *Sustainability Science*, 15(6), 1585-1599. <https://doi.org/10.1007/s11625-020-00792-z>
100. Nogeire-McRae, T., Ryan, E. P., Jablonski, B. B. R., Carolan, M., Arathi, H. S., Brown, C. S., Saki, H. H., McKeen, S., Lapansky, E., & Schipanski, M. E. (2018). The role of urban agriculture in a secure, healthy, and sustainable food system. *BioScience*, 68(10), 748-759. <https://doi.org/10.1093/biosci/biy071>
101. Odum, H. T. (1996). *Environmental accounting: Emergy and environmental decision making*. John Wiley & Sons. ISBN 978-0-471-11442-0



102. Olvera Cuessy, I., Islas Amador, G., Chávez Castillo, J. A., & Guerrero Morales, J. (2024). Un proyecto colectivo de agricultura urbana. En R. García Bustamante, Y. D. Caporal Guarneros, R. Vázquez Toríz, S. E. Rappo Míguez, & M. Ibarra Mateos (Coords.), *Agricultura urbana y periurbana en Puebla: Encuentro de propuestas, iniciativas y experiencias* (pp. [páginas del capítulo]). Universidad Iberoamericana Puebla.
103. Organización de las Naciones Unidas (UNEP). (2001, 22 de mayo). Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (POPs). Adoptada en Estocolmo, Suecia; entrada en vigor el 17 de mayo de 2004. Naciones Unidas, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Disponible en <https://www.pops.int/>
104. Organización de las Naciones Unidas. (1992). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Adoptada en Nueva York el 9 de mayo de 1992, entrada en vigor el 21 de marzo de 1994. Naciones Unidas. Disponible en <https://unfccc.int>
105. Organización de las Naciones Unidas. (1994). Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación en los países afectados por sequía grave o desertificación, en particular en África (UNCCD). Adoptada en París el 17 de junio de 1994, entrada en vigor en 1996. Naciones Unidas. Disponible en <https://www.unccd.int>
106. Orsini, F., Kahane, R., Nono-Womdim, R., & Gianquinto, G. (2013). Urban agriculture in the developing world: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33(4), 695–720. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0143-z>
107. Oumer, A. M., Burton, M., Hailu, A., & Mugeru, A. (2022). Technical efficiency and firm heterogeneity in stochastic frontier models: Application to smallholder maize farms in Ethiopia. *Journal of Productivity Analysis*, 57(2), 213-241. <https://doi.org/10.1007/s11123-022-00627-2>



108. Padrón Guillén, J. (2007). Tendencias epistemológicas de la investigación científica en el siglo XXI. III Congreso Nacional de Escuelas de Postgrado del Perú. Disponible en: https://padron.entretemas.com.ve/Tendencias/TendenciasRecientesEpistemologia_Padron.pdf
109. Pan, Y., Zhang, B., Wu, Y., & Tian, Y. (2021). Sustainability assessment of urban ecological-economic systems based on emergy analysis: A case study in Simao, China. *Ecological Indicators*, 121, 107157. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107157>
110. Pantoja-Calderón, R., Garcia-Cejudo, D., & Roggema, R. (2025). Addressing the Paradox of Food and Health in Mexico: A Landscape Urbanism Approach. *Land*, 14(3), Article 506. <https://doi.org/10.3390/land14030506>
111. Parent, B., Millet, E. J., & Tardieu, F. (2019). The use of thermal time in plant studies has a sound theoretical basis provided that confounding effects are avoided. *Journal of Experimental Botany*, 70(9), 2359–2370.
112. Parmeter, C. F., Simar, L., Van Keilegom, I., & Zelenyuk, V. (2024). Inference in the nonparametric stochastic frontier model. *Econometric Reviews*, 43(7), 518–539. <https://doi.org/10.1080/07474938.2024.2339193>
113. Pérez-Escamilla, R. (2005, junio 2). Seguridad alimentaria y nutricional: Marco conceptual. En XII Congresso Brasileiro de Sociologia, GT: Pobreza e (In)Segurança Alimentar: Políticas Públicas e Estratégias Familiares, Belo Horizonte, Brasil. University of Connecticut.
114. Pradhan, P., Subedi, D. R., Dahal, K., Hu, Y., Gurung, P., Pokharel, S., Kafle, S., Khatri, B., Basyal, S., Gurung, M., & Joshi, A. (2024). Urban agriculture matters for sustainable



- development. *Cell Reports Sustainability*, 1(9), Article 100217.
<https://doi.org/10.1016/j.crsus.2024.100217>
115. Pulighe, G., & Lupia, F. (2020). Food first: COVID-19 outbreak and cities lockdown a booster for a wider vision on urban agriculture. *Sustainability*, 12(12), Article 5012.
<https://doi.org/10.3390/su12125012>
116. Quilty, J. R., McKinley, J., Pede, V. O., Buresh, R. J., Correa Jr., T. Q., & Sandro, J. (2014). Energy efficiency of rice production in farmers' fields and intensively cropped research fields in the Philippines. *Field Crops Research*, 168, 8-18.
117. Reinhard, S., Lovell, C. A. K., & Thijssen, G. (1999). Econometric Estimation of Technical and Environmental Efficiency: An Application to Dutch Dairy Farms. *American Journal of Agricultural Economics*, 81(1), 44–60. <https://doi.org/10.2307/1244449>
118. Reinhard, S., Lovell, C. A. K., & Thijssen, G. (2002). Analysis of environmental efficiency variation. *American Journal of Agricultural Economics*, 84(4), 1054-1065.
119. Ried, K., & Fakler, P. (2011). Protective effect of lycopene on serum cholesterol and blood pressure: Meta-analyses of intervention trials. *Maturitas*, 68(4), 299-310.
<https://doi.org/10.1016/j.maturitas.2010.12.008>
120. Romanova, A., Schmutz, U., Pearson, S., Joyce, C. B., & Rossberg, A. G. (2021). Food safety considerations of urban agroforestry systems grown in contaminated environments. *Urban Agriculture & Regional Food Systems*, 6(1), e20008.
<https://doi.org/10.1002/uar2.20008>
121. Russ, A., & Gaus, M. B. (2021). Urban Agriculture Education and Youth Civic Engagement in the U.S.: A Scoping Review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5.
<https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.707896>



122. Santo, R., Palmer, A., & Kim, B. (2016). Vacant lots to vibrant plots: A review of the benefits and limitations of urban agriculture. Johns Hopkins Center for a Livable Future. <https://clf.jhsph.edu/sites/default/files/2019-01/vacant-lots-to-vibrant-plots.pdf>
123. Sanyé-Mengual, E., Anguelovski, I., Oliver-Solà, J., Montero, J. I., & Rieradevall, J. (2016). Resolving differing stakeholder perceptions of urban rooftop farming in Mediterranean cities: promoting food production as a driver for innovative forms of urban agriculture. *Agriculture and Human Values*, 33(1), 101-120. <https://doi.org/10.1007/s10460-015-9594-y>
124. Sanyé-Mengual, E., Orsini, F., Oliver-Solà, J., Rieradevall, J., Montero, J. I., & Gianquinto, G. (2015). An environmental and economic life cycle assessment of rooftop greenhouse (RTG) implementation in Barcelona, Spain. *Food Policy*, 51, 80-93.
125. Schatz, J., & Kucharik, C. J. (2016). Urban heat island effects on growing seasons and heating and cooling degree days in Madison, Wisconsin USA. *International Journal of Climatology*, 36(15), 4873-4884. <https://doi.org/10.1002/joc.4675>
126. Secretaría de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial del Estado de Puebla (SMADSOT). (2022). Manual de agricultura urbana (Serie: Manuales de adaptación al cambio climático, 2). Gobierno del Estado de Puebla. https://smadsot.puebla.gob.mx/images/2.%20Manual%20Agricultura%20Urbana_VF.pdf
127. Secretaría de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial. (2022). Manual de agricultura urbana (Serie: Manuales de adaptación al cambio climático, 2 de 5). Gobierno del Estado de Puebla. https://smadsot.puebla.gob.mx/images/2.%20Manual%20Agricultura%20Urbana_VF.pdf



128. Smit, J., Ratta, A., & Nasr, J. (1996). *Urban Agriculture: Food, Jobs and Sustainable Cities*. United Nations Development Programme.
129. Smith, L. C. (2002, septiembre 26–28). Keynote paper: The use of household expenditure surveys for the assessment of food insecurity. En FAO, *Measurement and assessment of food deprivation and undernutrition* (pp. 26–28). International Scientific Symposium, Rome, Italy. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/Y4249e/y4249e08.htm>
130. Smith, L. C., & Frankenberger, T. R. (2018). Does Resilience Capacity Reduce the Negative Impact of Shocks on Household Food Security? Evidence from the 2014 Floods in Northern Bangladesh. *World Development*, 102, 358–376. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2017.07.003>
131. Sofu, A., & Sofu, A. (2020). Converting home spaces into food gardens at the time of COVID-19 quarantine: All the benefits of plants in this difficult and unprecedented period. *Human Ecology*, 48(2), 131-139. <https://doi.org/10.1007/s10745-020-00147-3>
132. Sommerburg, O., Keunen, J. E., Bird, A. C., & van Kuijk, F. J. (1998). Fruits and vegetables that are sources for lutein and zeaxanthin: The macular pigment in human eyes. *British Journal of Ophthalmology*, 82(8), 907-910. <https://doi.org/10.1136/bjo.82.8.907>
133. Specht, K., Siebert, R., Hartmann, I., Freisinger, U. B., Sawicka, M., Werner, A., Thomaier, S., Henckel, D., Walk, H., & Dierich, A. (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.
134. Tacoli, C. (2003). The links between urban and rural development. *Environment and Urbanization*, 15(1), 3–12. <https://doi.org/10.1177/095624780301500111>



135. Terán-Samaniego, K., Robles-Parra, J. M., Vargas-Arispuro, I., Martínez-Téllez, M. Á., Garza-Lagler, M. C., Félix-Gurrrola, D., Maycotte-de la Peña, M. L., Tafolla-Arellano, J. C., García-Figueroa, J. A., & Espinoza-López, P. C. (2025). Agroecology and Sustainable Agriculture: Conceptual Challenges and Opportunities—A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 17(5), 1805. <https://doi.org/10.3390/su17051805>
136. Theodorou, A., Panno, A., Carrus, G., Carbone, G. A., Massullo, C., & Imperatori, C. (2021). Stay home, stay safe, stay green: The role of gardening activities on mental health during the COVID-19 home confinement. *Urban Forestry & Urban Greening*, 61, Article 127091. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127091>
137. Timans, R., Wouters, P., & Heilbron, J. (2019). Mixed methods research: what it is and what it could be. *Theory and Society*, 48(2), 193–216. <https://doi.org/10.1007/s11186-019-09345-5>
138. Timm, M., Offringa, L. C., Van Klinken, B. J.-W., & Slavin, J. (2023). Beyond insoluble dietary fiber: Bioactive compounds in plant foods. *Nutrients*, 15(19), 4138. <https://doi.org/10.3390/nu15194138>
139. Tornaghi, C. (2014). Critical geography of urban agriculture. *Progress in Human Geography*, 38(4), 551-567. <https://doi.org/10.1177/0309132513512542>
140. Toxqui-Roldán, J. L., Ortiz-Solorio, C. A., del Carmen Gutiérrez-Castorena, M., & Licona-Vargas, A. L. (2024). Agricultural terraces in Puebla, Mexico: An ethnopedological approach. *Geoderma Regional*, 39, e00873. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00873>
141. Tzouvelekas, V., Pantzios, C. J., & Fotopoulos, C. (2001). Technical efficiency of alternative farming systems: The case of Greek organic and conventional olive-growing farms. *Food Policy*, 26(6), 549-569.



142. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service. (2025). FoodData Central. <https://fdc.nal.usda.gov/>
143. Ugalde Lezama, S., Pérez-Guerrero, A., Buendía-Rodríguez, E., Monterroso-Rivas, A. I., & Olmos-Oropeza, G. (2024). Determination of the main agricultural crops for the Metropolitan Puebla-Tlaxcala area using the Papadakis Methodology. *Agro Productividad*, 16(10). <https://doi.org/10.32854/agrop.v16i10.2587>
144. United States Botanic Garden & American Public Gardens Association. (2024). 2024 Urban Agriculture Resilience Program [webpage]. Retrieved August 20, 2025, from <https://www.usbg.gov/2024-urban-agriculture-resilience-program> San Diego Botanic Garden+1Wikipedia+14United States Botanic Garden+14San Diego Botanic Garden+14
145. Vásquez Gallo, L. A. (2020). Buenas prácticas agrícolas (BPA). Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA.
146. Vikas, & Ranjan, R. (2024). Agroecological approaches to sustainable development. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1405409>
147. Viljoen, A., Bohn, K., & Howe, J. (2005). Continuous Productive Urban Landscapes: Designing Urban Agriculture for Sustainable Cities. Architectural Press.
148. Villavicencio-Valdez, G. V., et al. (2023). Urban agroecology enhances agrobiodiversity and resilience in Mexican intermediate cities: A case study of Querétaro. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1066428>
149. Wang, X., Ouyang, Y., Liu, J., Zhu, M., Zhao, G., Bao, W., & Hu, F. B. (2014). Fruit and vegetable consumption and mortality from all causes, cardiovascular disease, and cancer: Systematic review and dose-response meta-analysis of prospective cohort studies. *BMJ*, 349, g4490. <https://doi.org/10.1136/bmj.g4490>



150. Ward, F. A., & Michelsen, A. (2002). The economic value of water in agriculture: Concepts and policy applications. *Water Policy*, 4(5), 423-446.
151. Warren, E., Hawkesworth, S., & Knai, C. (2015). Investigating the association between urban agriculture and food security, dietary diversity, and nutritional status: A systematic review. *Food Policy*, 53, 54-66. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2015.03.004>
152. Xu, Q., Yang, Y., Hu, K., Chen, J., Djomo, S. N., Yang, X., & Knudsen, M. T. (2021). Economic, environmental, and energy analysis of China's green tea production. *Sustainable Production and Consumption*, 28, 269–280. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.04.019>
153. Young, R. A. (2005). *Determining the economic value of water: Concepts and methods*. Resources for the Future Press.
154. Yuan, G. N., Marquez, G. P. B., Deng, H., Iu, A., Fabella, M., Salonga, R. B., Ashardiono, F., & Cartagena, J. A. (2022). A review on urban agriculture: technology, socio-economy, and policy. *Heliyon*, 8(11), e11583. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11583>
155. Yuan, Q., Mi, S., Meng, F., Hou, J., Sun, Y., Li, H., & Shah, A. M. (2023). An energy analysis of environmental sustainability in urban agriculture: Evidence from protected agriculture in Beijing, China. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, Article 1288136. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1288136>
156. Zanatta Vidaurri, R. (2025, 23 de julio). *Iniciativa de Decreto por el que se reforma el acápite del artículo 2 Bis de la Ley de Desarrollo Social para el Estado de Puebla*. LXII Legislatura del Honorable Congreso del Estado Libre y Soberano de Puebla.
157. Zeeuw, H., Van Veenhuizen, R., & Dubbeling, M. (2011). The role of urban agriculture in building resilient cities in developing countries. *The Journal of Agricultural Science*, 149(S1), 153-163. <https://doi.org/10.1017/S0021859610001279>



158. Zelenyuk, V. (2023). Productivity analysis: Roots, foundations, trends and perspectives. *Journal of Productivity Analysis*, 60(3), 229–247. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11123-023-00692-1>
159. Zhang, J., S. Srinivasan, R., & Peng, C. (2020). A Systematic Approach to Calculate Unit Energy Values of Cement Manufacturing in China Using Consumption Quota of Dry and Wet Raw Materials. *Buildings*, 10(7), 128. <https://doi.org/10.3390/buildings10070128>
160. Zutter, C., & Stoltz, A. (2023). Community gardens and urban agriculture: Healthy environment/healthy citizens. *International Journal of Mental Health Nursing*, 32(6), 1452–1461. <https://doi.org/10.1111/inm.13149>



ANEXOS

Tablas de datos experimentales

Tabla a. Datos de temperatura, humedad, radiación solar, precipitación, sin procesar

fecha	TMAX	TMIN	PRECIPITACION	EVAP	T2M_MAX	T2M_MIN	RH2M	PRECTOTCORR	TMAX_OPE_NME_TEO	TMIN_OPE_NME_TEO	PREC_OPE_NME_TEO	HUM_OPE_NME_TEO	temp_max	temp_min	precipitacion	humedad
01-feb	24.2	7.8	0	4.08	23.62	8.52	53.32	0	21.9	7.2	0	52.63	23.422	7.902	0	53.044
02-feb	23.4	7.8	0	4.24	23.45	8.53	62.11	0	21.6	7.6	0	57.25	22.9675	8.0055	0	60.166
03-feb	24.4	7.8	0	3.38	23.9	9.28	62.4	0.27	22	7.5	0	58.04	23.625	8.243	0.081	60.656
04-feb	25.6	8.8	0	4.6	22.9	8.17	67.5	1.24	22	7.9	0.3	57.42	23.755	8.3545	0.432	63.468
05-feb	23.6	7	0	4.6	21.85	6.43	53.7	0.12	21.1	8.3	0	53.21	22.3625	7.1255	0.036	53.504
06-feb	23.6	6.6	0	3.02	23.73	7.6	50.02	0.06	22	8.5	0	47.83	23.2455	7.425	0.018	49.144
07-feb	23.2	8.8	0.1	4.15	21.34	8.71	64.02	1.55	21.5	8.3	0.4	59.46	22.124	8.6435	0.595	62.196
08-feb	18.2	8.6	1.5	1.56	18.18	7.17	68.82	3.98	17	8.6	3.8	76.08	17.893	8.0995	2.704	71.724
09-feb	21.4	6.8	0	4.54	20.59	5.46	64.38	0.07	19	5.8	0	66.08	20.5165	6.081	0.021	65.06
10-feb	21.2	6.8	0	3.88	20.48	7.14	65.32	0.45	18.6	7.6	0	60.25	20.298	7.119	0.135	63.292
11-feb	22	6.2	0	3.49	21.1	8.23	62.57	0.04	18.8	7.1	0	55.08	20.885	7.1355	0.012	59.574
12-feb	22.6	11.8	0	5.28	22.83	7.7	57.34	0.91	18.3	10.8	0.6	50.25	21.6055	10.115	0.393	54.504
13-feb	22.8	8.4	0	3.92	21.41	6.95	57.21	1.33	20.7	8.9	1.9	59.96	21.7885	8.0175	0.779	58.31
14-feb	24	5.6	0	4.39	21.17	7.25	51.52	0.23	21.4	6.4	0	56.42	22.3595	6.3775	0.069	53.48
15-feb	25.8	7	0	4.26	23.9	7.03	53.71	0.14	22.5	7.7	0.5	54.58	24.31	7.1855	0.142	54.058
16-feb	26.6	7	0	4.84	25.02	9.33	46.4	0.04	22.9	8.5	0.1	49.63	25.122	8.1905	0.032	47.692
17-feb	28.4	9	0	4.19	26.39	9.93	45.3	0.01	25.2	8	0	49.67	26.8965	9.0755	0.003	47.048
18-feb	28.4	9	0	5.85	26.32	9.37	51.12	0.13	26.3	8.9	0	45.54	27.147	9.1045	0.039	48.888
19-feb	26.2	8.2	0	5.86	26.07	8.25	57.33	0.11	25	8.6	0	51.71	25.8545	8.3175	0.033	55.082
20-feb	26.8	7.6	0	4.22	25.95	7.96	57.56	0.07	25.7	8.3	0	49.5	26.2275	7.901	0.021	54.336
21-feb	29.2	6.6	0	6.77	27.12	7.91	36.14	0	26	8.4	0	36.5	27.672	7.5085	0	36.284
22-feb	30.2	8.6	0	5.39	28.22	10.96	35.14	0	27	8.3	0.1	44.71	28.707	9.351	0.02	38.968
23-feb	30.2	8.8	0	6.42	28.62	10.5	38.11	0.01	27.8	9.6	0	32.92	29.047	9.595	0.003	36.034
24-feb	27.4	6.6	0	4.07	26.13	9.77	35.56	0.08	25.5	7.9	0	28.75	26.4805	8.0345	0.024	32.836
25-feb	27	8.2	0	6.42	26.39	8.35	52.66	1.28	26	9.5	0	43.63	26.5365	8.5775	0.384	49.048
26-feb	26.8	8.8	0	5.08	26.18	8.37	55.65	0.4	24.5	8.7	0	52.63	26.008	8.6245	0.12	54.442
27-feb	27.2	8	0	5.31	26.08	8.41	53.67	0.3	25.3	8.4	0	45.58	26.333	8.2435	0.09	50.434
28-feb	25.2	5.6	0	5.32	23.74	5.32	53.84	0.26	23.4	6.2	0	47.46	24.239	5.652	0.078	51.288
01-mar	26.6	4.8	0	5.09	26.07	6.28	39.81	0	25	6.2	0	43.17	26.0145	5.668	0	41.154
02-mar	27.8	6.6	0	4.87	26.61	7.42	37.52	0.01	25	6.5	0	34	26.6835	6.862	0.003	36.112
03-mar	27	7.2	0	5.48	27.03	7.83	36.56	0.06	25	8.2	0	40.04	26.5105	7.6705	0.018	37.952
04-mar	27.6	7	0	3.69	26.87	7.5	46.63	0.02	25.4	8.1	0	37.83	26.7945	7.45	0.006	43.11
05-mar	27.4	5	0	7.02	27.04	8.54	55.28	0	25	10.1	0	42.96	26.674	7.514	0	50.352
06-mar	27.8	9	0	5.05	27.37	9.98	53.01	0	25.6	10	0	52.25	27.0995	9.593	0	52.706
07-mar	28.2	12	0	4.6	28.21	11.11	50.89	0.12	26	10.3	2.1	55.92	27.6535	11.2635	0.456	52.902



08-mar	27	12.8	0	6.49	25.94	10.34	50.68	0.05	23.9	11.3	0	50.88	25.854	11.564	0.015	50.76
09-mar	26.4	9.2	0	6.14	26.22	8.94	45.76	0.13	23.9	10.1	0	41.21	25.712	9.334	0.039	43.94
10-mar	26.2	9.2	0	6.05	27.12	8.6	48.28	0	24.3	8.8	0	42.88	26.047	8.89	0	46.12
11-mar	27.8	10	0	4.27	28.32	7.6	43.55	0.09	25.1	9.9	0	42.96	27.307	9.135	0.027	43.314
12-mar	24.2	10.6	0	5.98	25.14	8.8	48.81	1.28	26.3	10.1	0	49	25.054	9.845	0.384	48.886
13-mar	26.4	6.4	0	5.17	26.56	8.79	40.15	0	24.2	9.2	0	46.71	25.906	7.9365	0	42.774
14-mar	28.4	9.2	0	5.88	27.72	9.18	43.07	0.05	26	9.9	0	47	27.562	9.368	0.015	44.642
15-mar	29	11	5.9	5.67	27.71	11.14	55.97	2.77	26.7	10.4	7.2	55.33	27.973 5	10.899	5.221	55.714
16-mar	26.6	9	0	4.83	24.75	11.89	63.28	4.14	23.3	9.6	0.2	65.83	25.127 5	10.161 5	1.282	64.3
17-mar	26.6	10.4	0	5.1	26.35	11.54	54	0.72	23.8	10.3	0.1	59.42	25.812 5	10.774	0.236	56.168
18-mar	29.7	11.2	0	5.99	28.09	10.41	46.8	0.04	24.8	9.5	0.3	54.5	27.911 5	10.498 5	0.072	49.88
19-mar	29	11.4	0	7.45	26.46	11.56	57.33	0.97	25	10.4	0	49.92	27.111	11.206	0.291	54.366
20-mar	29.2	12	0	4.58	27.22	11.82	56.38	0.13	25.5	10.1	0	56.75	27.582	11.462	0.039	56.528
21-mar	29	11.2	0	6.59	28.46	10.54	48.91	0.01	25.8	12.4	0	42.13	28.011	11.269	0.003	46.198
22-mar	28.4	13	0	7.1	27.63	10.06	42.98	0	25.5	11.5	0	39.33	27.405 5	11.596	0	41.52
23-mar	27.2	11	0	6.52	27.6	10.99	42.65	0.29	25.1	11.6	0	35.71	26.815	11.146 5	0.087	39.874
24-mar	27.4	10	0	6.22	26.12	10.38	59.02	0.97	25.6	9.6	0	45.71	26.502	10.033	0.291	53.696
25-mar	27.2	8	0	6.43	26.39	7.84	43.81	0	25.4	9.7	0	36.46	26.466 5	8.369	0	40.87
26-mar	28.4	8.8	0	5.97	27.77	8.66	28.42	0	28.2	9.6	0	28.63	28.129 5	8.951	0	28.504
27-mar	28.8	7.2	0	6.67	27.94	8.66	22.47	0.14	26.6	8	0	16.46	27.949	7.911	0.042	20.066
28-mar	29.8	8.6	0	6.54	28.1	10.24	31.87	0	26.6	9	0	23.63	28.405	9.274	0	28.574
29-mar	30.4	9.4	0	5.85	29.13	11.22	37.62	0	27.6	10.1	0	29.58	29.255 5	10.212	0	34.404
30-mar	29.8	12.4	0	7.44	30.35	9.19	35.86	0	27.4	12	0	30.29	29.392 5	11.176 5	0	33.632
31-mar	29.4	10.8	0	6.79	29.36	10.43	28.83	0	27.6	9.7	0	23.96	28.936	10.395 5	0	26.882
01-abr	29.2	12.6	0	6.19	29.16	11.61	38.67	0	27.4	10.2	0	39.17	28.736	11.653 5	0	38.87
02-abr	31.8	12.4	0	5.69	30.85	12.07	41.39	0	28.6	10.2	0	42.46	30.667 5	11.734 5	0	41.818
03-abr	29.4	13.6	0	7.33	29.96	12.95	40.57	0	27.3	11.7	0	37.42	29.071	12.897 5	0	39.31
04-abr	29.2	12.6	0	7.5	29.62	11.97	34.25	0	26.8	11.7	0	36.75	28.747	12.154 5	0	35.25
05-abr	29.8	13.2	0	7.11	29.15	11.06	36.51	0	26.8	11.7	0	38.04	28.822 5	12.076	0	37.122
06-abr	31.8	13.2	0	8.02	31.38	11.92	28.02	0	29.3	10.1	0	33.58	31.028	11.977	0	30.244
07-abr	28.6	13.6	0	7.31	28.74	11.48	41.12	0.63	29.1	13.7	1.2	37.58	28.774	12.883	0.429	39.704
08-abr	26.8	10.8	0	3.47	27.07	9.79	47.27	1.94	23.9	9.7	9.5	65.54	26.169 5	10.171 5	2.482	54.578
09-abr	27.4	9.4	0	6.93	27.13	10.81	47.41	0.98	25	10.6	1.1	66.08	26.705 5	10.193 5	0.514	54.878
10-abr	28.2	11	0	4.96	28.16	10.52	48.8	1.59	24.3	10.1	1.5	62.04	27.211	10.607	0.777	54.096
11-abr	30	11.8	4.4	8.45	27.7	12.98	52.24	1.62	25.3	11.1	4.8	71.46	28.02	12.038	3.646	59.928
12-abr	28.8	14.4	0	4.41	29	13.01	47.91	1.01	25.6	10.9	0.5	64.29	28.07	13.038 5	0.403	54.462
13-abr	29	13.8	0	5.86	30.38	13.23	45.84	0	27.1	11.8	0	56.54	29.008	13.100 5	0	50.12
14-abr	31	14.2	0	6.36	29.58	14.57	51.91	0	26.8	13.4	0.1	59.21	29.453	14.129 5	0.02	54.83
15-abr	31	15.2	0	4.72	28	15.69	59.31	0.42	28.3	13.3	9.4	68.04	29.275	14.896 5	2.006	62.802
16-abr	33.4	15.4	0	8.02	33.09	14.65	45.12	0.01	28.5	12.8	0	54.29	32.066 5	14.487 5	0.003	48.788
17-abr	33.8	12	0	7.25	32.61	15.21	32.81	0	30.1	11.7	0	37.63	32.458 5	13.048 5	0	34.738
18-abr	33	12.8	0	7.1	31.14	15.87	39.83	0.17	29	12.3	0	40.75	31.349	13.749 5	0.051	40.198



19-abr	29	14	0	3.8	30.32	13.93	49.23	1.33	25.9	13.6	2.9	62.33	28.687	13.875 5	0.979	54.47
20-abr	30.2	11.6	1	5.99	31.5	12.44	47.49	0.9	26.2	10.9	3.4	66.42	29.655	11.719	1.45	55.062
21-abr	30.2	12.6	4.8	6.64	28.39	14.21	60.97	4.68	25.6	13	6	67.79	28.416 5	13.263 5	5.004	63.698
22-abr	27.8	12.2	0	5.29	28.29	12.71	53.35	1.07	23.9	10.8	1.9	71.54	26.996 5	12.028 5	0.701	60.626
23-abr	29.2	11	0	5.11	29.7	11.37	51.16	0.28	23.8	10	0.5	64.25	28.025	10.879 5	0.184	56.396
24-abr	28.6	12.8	0	3.79	30.3	12.68	52.67	3.17	23.7	11.5	0.2	69.58	27.97	12.433	0.991	59.434
25-abr	28.8	12.2	0	6.78	30.1	13.15	55.35	2.77	25.7	10.9	8.2	70.96	28.48	12.207 5	2.471	61.594
26-abr	24.2	13.2	16.9	8.4	23.37	12.3	66.72	4.74	23.6	10.5	1.6	70.67	23.759 5	12.21	10.192	68.3
27-abr	26.8	7.6	12.7	0.97	27.09	9.72	54.53	1.39	23.2	9.9	0.1	65.96	26.001 5	8.917	6.787	59.102
28-abr	28.6	11.6	0	6.16	28.72	11.22	52.31	0.88	24.5	9.2	1	63.92	27.617	10.867	0.464	56.954
29-abr	29.2	13.2	0	5.03	28.89	12.92	55.46	1.35	25	11.1	0.5	64.67	28.041 5	12.577	0.505	59.144
30-abr	29.6	13.2	0	5.95	28.74	13.53	50.38	1.72	25.5	11.9	1	62.33	28.274	12.990 5	0.716	55.16
01-may	29.2	13.4	0	5.67	28.21	14.23	56.18	2.18	25.5	14.4	2.4	67.17	27.928 5	13.940 5	1.134	60.576
02-may	29.6	13.2	0.6	5.44	30.49	13.64	55.47	1.01	26.4	12.8	0	61.04	29.111 5	13.254	0.603	57.698
03-may	31.2	13.4	11	4.62	31.16	14.31	49.41	0.39	28.9	11.7	2.6	57.63	30.611	13.293 5	6.137	52.698
04-may	30.8	12.6	0	6.86	31.53	14.53	45.59	0.01	28.5	12.4	0	48.08	30.480 5	13.225 5	0.003	46.586
05-may	32.2	11.8	0	7.23	31.85	12.85	39.47	0	29.1	11.1	0	43.58	31.302 5	11.992 5	0	41.114
06-may	31.6	13.2	0.6	7.01	32.82	15.26	41.33	0.64	29.2	11.8	4.2	55.83	31.427	13.571	1.332	47.13
07-may	31.6	14.2	2.5	6.23	32.58	14.53	40.37	1.34	29.2	11.3	0	50.21	31.343	13.590 5	1.652	44.306
08-may	31.8	13.4	1.9	5.95	31.54	14.33	46	0.84	28.3	13.3	0.4	53.08	30.834	13.700 5	1.282	48.832
09-may	32.6	12.4	4.4	7.7	32.27	14.67	36.86	0.25	30.5	12.4	1	47.54	31.959 5	13.194 5	2.475	41.132
10-may	31.8	11.6	0	8.63	32.16	13.92	48.7	1.49	31.5	12.6	0	41.92	31.851	12.662	0.447	45.988
11-may	28	12.6	0	5.47	29.04	11.99	55.05	1.3	28	13.4	0.1	53.46	28.364	12.586 5	0.41	54.414
12-may	29.8	10	0	8.04	28.95	8.92	47.36	0.03	28.2	11.6	0	45.04	29.102 5	10.022	0.009	46.432
13-may	29.6	11	0	5.71	30.71	10.54	44.02	0	26.7	12.2	0.1	50.96	29.263 5	11.139	0.02	46.796
14-may	30	11.8	0	5.64	31.5	13.6	38.7	0.03	28.8	12.3	0	45.75	30.225	12.555	0.009	41.52
15-may	30.4	12	0	7.43	31.15	13.53	38.03	0.02	30	11.9	0	41.54	30.562 5	12.510 5	0.006	39.434
16-may	24.6	9.2	0	7.19	30.64	12.84	36.86	0.08	28.3	10	0	31.25	27.639	10.674	0.024	34.616
17-may	29.6	12	0	7.99	31.48	13	35.77	0	27.7	12.5	0	39.63	29.783	12.475	0	37.314
18-may	30	13.4	0	6.24	31.88	13.84	33.81	0	28.5	12.2	0	47.33	30.283	13.254	0	39.218
19-may	31	14	0	8.18	31.95	12.72	35.63	0	28.7	12.6	0	41.79	30.757 5	13.202	0	38.094
20-may	30.5	14.6	0	6.28	32.6	11.41	36.42	0.12	28.6	12.5	0.1	51.88	30.76	12.958 5	0.056	42.604
21-may	31.8	15.6	0	7.33	32.32	14.32	30.1	0.22	29.4	13.8	0	38.83	31.382	14.702	0.066	33.592
22-may	30.6	14.8	3	3.79	32.51	14.95	38.73	1.16	28.1	13.9	1	52.21	30.643 5	14.627 5	2.048	44.122
23-may	28.2	13.2	2.3	6.24	31.5	13.21	48.76	1.47	26	12.2	1.9	61.42	28.805	12.953 5	1.971	53.824
24-may	29	12.4	5	4.54	29.89	14.72	53.22	3.22	25.9	14	4.1	62.42	28.536 5	13.612	4.286	56.9
25-may	30.2	12	0	7.25	30.65	14.93	58	1.56	27.8	10.8	0.1	57.67	29.757 5	12.725 5	0.488	57.868
26-may	30.8	12	0	8.47	29.67	12.9	53.6	0.39	28.5	12.9	0	47.88	29.829 5	12.54	0.117	51.312
27-may	29	11.8	0	7.21	28.47	12.9	55.15	0.34	28.7	11.9	0	45.38	28.739 5	12.21	0.102	51.242
28-may	28.2	12.2	0	6.97	27.99	12.66	55.41	0.67	29.3	12.5	0.1	52	28.401 5	12.436	0.221	54.046



29-may	28.8	12	0	5.2	28.82	12.7	55.85	0.16	26.6	12.4	1	59	28.257	12.345	0.248	57.11
30-may	28.6	14.4	4.2	3.5	27.38	13.5	61.69	1.24	24.3	13.4	0.5	67.58	27.098	13.835	2.572	64.046
31-may	24.8	12.8	9.2	1.86	28.19	14.25	57.97	3.5	23.4	13	7.8	74.79	25.636 5	13.357 5	7.21	64.698
01-jun	27.4	11.2	0	4.32	28.83	13.33	55.78	5.11	23.4	11.9	3.8	73.58	26.900 5	12.120 5	2.293	62.9
02-jun	27	11.4	2.1	5.03	27.38	12.16	60.89	7.14	23.8	11.7	2.8	68.79	26.333	11.741	3.752	64.05
03-jun	29.4	11.2	0	5.13	29.25	12.47	51.42	1.04	26.7	11.1	0.5	60.63	28.672 5	11.619 5	0.412	55.104
04-jun	30	11.8	4.2	7.33	31.06	13.53	47.55	0.2	26.2	11.5	0.4	61.54	29.421	12.330 5	2.24	53.146
05-jun	30.2	11.6	0.7	4.52	30.22	15.28	56.65	1.04	24.1	13.7	4.2	76.92	28.682	13.413	1.502	64.758
06-jun	29	14.6	0	6.21	31.42	14.83	49.91	0.85	25	13.5	0.7	69.13	28.847	14.405 5	0.395	57.598
07-jun	28.8	15.8	0.6	6.51	29.64	14.71	55.47	1.6	25.4	13	2.2	68.21	28.244	14.718 5	1.22	60.566

Tabla b. Rendimientos hortalizas

	HUERTO URBANO 1				HUERTO URBANO 2				HUERTO URBANO 3			
	ACEL GA	ESPIN ACA	LECH UGA	TOM ATE	ACEL GA	ESPIN ACA	LECH UGA	TOM ATE	ACEL GA	ESPIN ACA	LECH UGA	TOM ATE
PLANTA 1	510.9	213.4	291.4	485.1	436.3	202.7	280.8	550.7	453.6	200.4	288.7	397.1
PLANTA 2	522.5	218.2	298	496.2	446.2	207.3	287.2	563.2	464	204.9	295.3	406.2
PLANTA 3	534.2	223.1	304.6	507.2	456.1	211.9	293.6	575.7	474.3	209.5	301.9	415.2
PLANTA 4	545.8	228	311.2	518.2	466.1	216.5	300	588.3	484.6	214	308.4	424.2
PLANTA 5	557.4	232.8	317.9	529.2	476	221.1	306.3	600.8	494.9	218.6	315	433.2
PLANTA 6	569	237.6	324.5	540.3	485.9	225.7	312.7	613.3	505.2	223.1	321.5	442.3
PLANTA 7	592.2	247.4	337.7	562.3	505.7	234.9	325.5	638.3	525.8	232.3	334.7	460.3
PLANTA 8	603.8	252.2	344.3	573.4	515.6	239.5	331.9	650.8	536.1	236.8	341.2	469.4
PLANTA 9	615.4	257	351	584.4	525.5	244.1	338.2	663.3	546.4	241.4	347.8	478.4
PLANTA 10	627	261.9	357.6	595.4	535.5	248.7	344.6	675.9	556.7	245.9	354.3	487.4
PLANTA 11	638.7	266.8	364.2	606.4	545.4	253.3	351	688.4	567.1	250.5	360.9	496.4
PLANTA 12	650.3	271.6	370.8	617.5	555.3	257.9	357.4	700.9	577.3	255	367.5	505.5
Total	6967.2	2910	3973.2	6615.6	5949.6	2763.6	3829.2	7509.6	6186	2732.4	3937.2	5415.6
Promedio	580.6	242.5	331.1	551.3	495.8	230.3	319.1	625.8	515.5	227.7	328.1	451.3
POR PLANTA	580.6	242.5	331.1	551.3	495.8	230.3	319.1	625.8	515.5	227.7	328.1	451.3
POR 6 PLANTAS	3483.6	1455	1986.6	3307.8	2974.8	1381.8	1914.6	3754.8	3093	1401	1956.5	2707.8
POR 12 PLANTAS	6967.2	2910	3973.2	6615.6	5949.6	2763.6	3829.2	7509.6	6186	2732.4	3937.2	5415.6
PESO MINIMO COMERCIAL	500	150	400	4500	500	150	400	4500	500	150	400	4500
PESO MAXIMO COMERCIAL	700	250	500	6000	700	250	500	6000	700	250	500	6000



Diagramas de flujos energéticos (energía)

